М.М. ДАГАЕВ



КНИГА ДЛЯ ЧТЕНИЯ ПО АСТРОНОМИИ

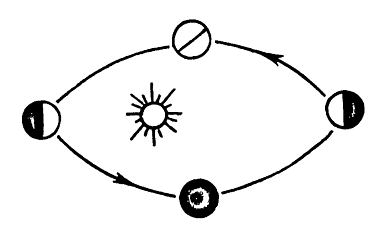




М. М. ДАГАЕВ

КНИГА ДЛЯ ЧТЕНИЯ ПО АСТРОНОМИИ

Пособие для учащихся



МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1980

ББК 22.6
Д14

Рекомендовано к изданию
Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР

Дагаев М. М.

Д14 Книга для чтения по астрономии: Пособие для учащихся. — М.· Просвещение, 1980. — 159 с., ил.

В пособии в интересной и доступной для учащихся форме рассказано о движении и условиях видимости планет, о системах счета времени и календаре, о практическом применении астрономии, описаны простейшие вычисления параметров полета искусственных небесных тел, т. е. изложены сведения, углубляющие и дополняющие школьный курс астрономии.

Д $\frac{60601-321}{103(03)-80}$ инф. письмо 4306021200

ББК 22.6
52

ГЛАВА I

ЗВЕЗДНОЕ НЕБО И ДВА ОСНОВНЫХ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ

ЗАРОЖДЕНИЕ АСТРОНОМИИ

На заре человеческого общества, когда единственным источником жизни людей были рыбная ловля и охота на диких зверей, у людей возникла необходимость отыскивать дорогу к своим пещерам и к местам удачной охоты. По мере прогресса человеческого общества, с развитием земледелия, появилась потребность в счете времени для предсказания наступления различных сезонов года и регулирования сельскохозяйственных работ

Народы, жившие в глубокой древности, не имели в своем распоряжении даже элементарных основ современных нам наук. Но так же, как и теперь, днем над ними было Солнце, а ночью — звездное небо, по которым они постепенно учились ориентироваться на местности и вести счет времени. Эта практическая потребность изучения звездного неба привела к зарождению начатков науки, получившей впоследствии в Древней Греции около IV в. до н. э. название астрономии, происшедшее от двух греческих слов: «астрон» — звезда (вспомните астру — цветок звездообразного вида) и «номос» — закон.

Но само название отнюдь не служит доказательством зарождения и развития астрономии только в Древней Греции. Астрономия возникла и самостоятельно развивалась буквально у всех народов, но степень ее развития, естественно, находилась в прямой зависимости от уровня производительных сил и культуры народов.

Возникновение древних централизованных государств стимулировало развитие астрономии, которая постепенно накапливала результаты наблюдений небесных светил и подмечала периодичность небесных явлений. Расширение производства, торговли с соседними государствами, мореплавание и военные походы требовали усовершенствования способов астрономической ориентировки и счета времени. А это, в свою очередь, приводило к необходимости уточнения видимых положений небесных светил, для чего нужны были специальные измерительные инструменты. Измерения всегда связаны с числовыми расчетами, которые невозможны без математики. Таким образом, наука создавалась человечеством не ради отвлеченного интереса, а для решения стоящих перед ним практических задач.

Астрономическая ориентировка настоятельно требовала изучения звездного неба. Но зоркий невооруженный глаз видит одновременно на небе до трех тысяч звезд, и, казалось бы, трудно разобраться в их обилии. Однако любая сложная задача может быть разрешена, если найти правильный подход к ее решению. Для ориентировки, например, достаточно было ограничиться изучением расположения сравнительно ярких звезд, которых на небе не так уж много. Такие звезды были сгруппированы в фигуры, хорошо запоминающиеся своими контурами и получившие название созвездий, т е. сочетаний звезд. Значительно позже к созвездиям отнесли и слабые звезды, расположенные вблизи ярких.

Разные народы создавали своим воображением различные по виду созвездия, а если случайно контуры созвездий совпадали, то, естественно, именовали их по-разному. Источниками названий созвездий, как правило, служили мифы о богах, сказания о легендарных героях и связанных с ними событиях, названия различных животных и орудий производства, используемых народами в повседневной жизни. Так, известную группу из семи ярких звезд, напоминающую очертание ковша, древние греки назвали Большой Медведицей (рис. 1). Если к этой группе звезд присоединить слабые звезды, расположенные вблизи ковша, то при достаточной фантазии можно провести границы этого созвездия так, что они будут напоминать собой очертания какого-то большого зверя.

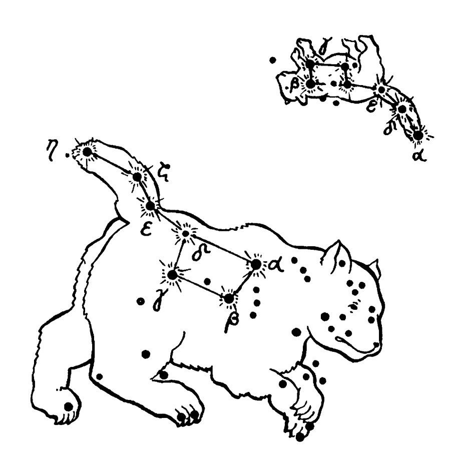


Рис. 1. Созвездия Большой Медведицы и Малой Медведицы.

В Древней Руси это же созвездие имело разные названия: Воз, Колесница, Кастрюля, Ковш; народы, населявшие территорию Украины, называли его Телегой; в Заволжье оно звалось Большим Ковшом, а в Сибири — Лосем. И до сих пор в некоторых областях нашей страны сохранились эти названия.

По аналогии, другую группу из семи, но более слабых звезд, расположенную вблизи Большой Медведицы и также напоминающую очертания ковша, древние греки назвали созвездием Малой Медведицы. Эта же группа звезд была наименована сибиряками Малым Ковшом, а народы, населявшие побережье Ледовитого океана, видели в ней белого медведя с задранной вверх головой, на носу которого красовалась Полярная звезда, расположенная в самом конце ручки ковша (рис. 2).

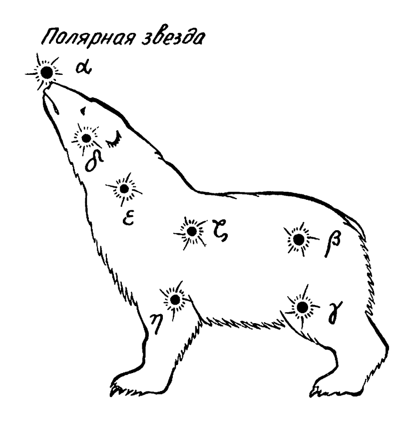


Рис. 2. Созвездие Малой Медведицы в виде белого медведя.

Древние народы, населявшие территорию нынешней Казахской ССР, оба эти созвездия объединяли в одно. Наблюдая звездное небо, они, как и другие народы, обратили внимание на неподвижность Полярной звезды, всегда занимающей одно и то же положение над горизонтом. Вполне естественно, что эти народы, основным родом занятий которых было коневодство, назвали Полярную звезду Железным гвоздем (Темир-казык), вбитым в небо, а в цепочке со-

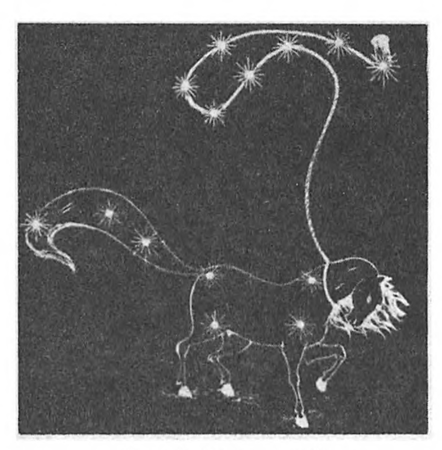


Рис. 3. Созвездие Коня.

седних звезд видели привязанный к этому гвоздю аркан, надетый на шею Коня, обегавшего в течение суток свой путь вокруг гвоздя (рис. 3).

Можно привести множество подобных примеров, но и этих вполне достаточно, чтобы убедиться в самостоятельном развитии астрономических знаний у разных народов и в условности контуров и названий созвездий.

Среди ярких звезд было обнаружено пять таких, которые не занимали постоянного места в созвездиях, а постепенно перемещались по ним. Эти пять звездообразных светил были названы в Древней Греции планетами[1] (от греческого «планетес» — блуждающая). Непонимание загадочного движения и природы планет привело к их обожествлению. Им были присвоены имена древнегреческих богов, а в эпоху римского владычества — имена древнеримских богов, сохранившиеся в науке до сего времени. Наиболее быстро движущуюся планету назвали Меркурием, по имени посланца-скорохода главного бога Юпитера. Очень яркая и изумительная по красоте своего блеска планета названа Венерой, именем богини красоты. Планета красноватого цвета получила имя римского бога войны Марса. Яркая и медленно перемещающаяся планета названа именем главного бога римской мифологии — Юпитера. Наконец, планете желтоватого цвета, подолгу передвигающейся в пределах одного созвездия, присвоено имя Сатурна — римского бога времени и земледелия.

Здесь уместно сказать, что обожествление небесных светил привело к поверью об их воздействии на судьбы людей, общин и даже целых государств, породило ложные религиозные представления о мире и вызвало возникновение антинаучного учения, известного в истории под названием астрологии. Поддерживаемая христианской религией, астрология особенно сильно расцвела в Европе в мрачные средние века и существует даже теперь в ряде капиталистических стран, окончательно выродившись в откровенное шарлатанство. Любопытно отметить, что на Руси астрология не получила распространения, хотя суеверий было много. Обожествление Солнца, Луны и пяти планет нашло отражение во многих религиях (иудейской, христианской, магометанской и др.), в которых число 7 считается священным.

Астрономические знания, добытые в различных странах, не оставались изолированными. С развитием связей между государствами и завоеванием территорий они проникали из одной страны в другую, объединялись и оказывали взаимное влияние. Так из отрывочных астрономических сведений различных народов постепенно складывались основы науки астрономии.

---

[1] В настоящее время термин «планета» имеет совсем иное значение — это холодное шарообразное тело, обращающееся вокруг Солнца. Освещаемые Солнцем планеты видны на звездном небе.

Простое накопление наблюдений еще не составляет науки, а служит лишь ее фундаментом. Наука формируется при возникновении теорий, стремящихся объяснить наблюдаемые факты и свести их в определенную логическую систему. Правильность создаваемых теорий проверяется наблюдениями, т е. сравнением теоретических следствий с наблюдаемыми явлениями. Первые дошедшие до нас научные астрономические теории, основанные на наблюдениях, возникли в Древней Греции, поэтому она справедливо считается родоначальницей науки астрономии. Не удивительно, что в терминологии современной астрономии сохранилось много греческих названий.

СОВРЕМЕННЫЕ СОЗВЕЗДИЯ И БЛЕСК ЗВЕЗД

Названия подавляющего большинства созвездий, видимых в северном полушарии Земли, перешли к нам от древнегреческой астрономии и заимствованы из мифов и легенд той далекой эпохи. В эпоху Возрождения, в XV—XVI вв., европейцы начали прокладывать морские пути в южном земном полушарии. Там перед ними во всей красе предстало звездное небо, невидимое в Европе, и для ориентации своих кораблей в безбрежных просторах океана они стали объединять звезды южного неба в созвездия. Сейчас уже невозможно установить, кто именно из европейцев начал выделять созвездия на звездном небе южного полушария Земли и присваивать им названия, по-видимому, первыми были голландские моряки. Так это или иначе, но в звездном атласе «Уранометрия», изданном в 1603 г. немецким астрономом Иоганном Байером (1572—1625), впервые изображены созвездия южного неба с их названиями. Эти названия уже не имеют ничего общего с древнегреческой мифологией, а заимствованы европейцами из обнаруженной и дотоле неизвестной им природы: Золотая Рыба, Индеец, Летучая Рыба, Павлин, Райская Птица, Тукан, Хамелеон и др. В середине XVIII в. началось интенсивное изучение южного звездного неба европейскими астрономами, в частности французом Николя Лакайлем (1713—1762), и созданные воображением новые созвездия получили более современные и прозаические названия: Компас, Микроскоп, Насос, Печь, Телескоп, Часы, Циркуль и т. п.

В настоящее время под созвездиями подразумевают не выделяющиеся группы звезд, а участки звездного неба, так что все звезды причислены к созвездиям. Современные границы и названия созвездий утверждены в 1922 г. на I съезде Международного астрономического союза, созданного в 1919 г. Решением этого съезда все небо разделено на 88 созвездий, из которых 31 находится в северном небесном полушарии, 48 — в южном, а остальные 9 принадлежат обоим полушариям и расположены по обе стороны от воображаемого на небе большого круга — небесного экватора, разделяющего небесную сферу на два полушария.

Невооруженным глазом среднего зрения можно видеть на всем небе около пяти с половиной тысяч звезд, а над территорией СССР — около трех тысяч. Немногие очень яркие звезды сразу привлекают к себе внимание, другие менее ярки, третьи слабее их, а большинство звезд настолько слабо светят, что еле различимы глазом. В оптические инструменты видно несметное множество еще более слабых звезд. В астрономии принято различать звезды по блеску, который характеризует интенсивность (количество) света звезд, доходящего

до Земли, а еще точнее — представляет собой освещенность, производимую светом звезд. Необходимость в оценке блеска звезд возникла еще во II в. до н. э. Такие оценки впервые были проведены выдающимся древнегреческим астрономом Гиппархом Родосским (180—110 до н. э.), который выразил блеск звезд в условных единицах — звездных величинах. В те далекие времена расстояния всех звезд от Земли считались одинаковыми, поэтому Гиппарх предполагал, что блеск звезд определяет их размеры. Наиболее ярким звездам он приписал первую звездную величину, а блеск наиболее слабых звезд, еще различимых невооруженным глазом, обозначил шестой звездной величиной. Звезды промежуточного блеска, в порядке его убывания, были оценены второй, третьей, четвертой и пятой звездной величиной. Таким образом, получилась шкала звездных величин, в которой, чем больше блеск звезды (т е. чем звезда ярче), тем меньше ее звездная величина. С ослаблением блеска звездная величина увеличивается.

Когда в первой половине XIX в. появились звездные фотометры[1] (оптические приборы для количественного сравнения интенсивности света звезд), выяснилось, что при разности в одну звездную величину блеск звезд различается примерно в 2,5 раза. Такое различие не случайно, а является прямым следствием восприятия света глазом, частным случаем более общего психофизиологического закона, сформулированного в XIX в. Э. Вебером (1795—1878) и Г Фехнером (1801—1887). Закон Вебера—Фехнера гласит: изменение какого-либо ощущения прямо пропорционально относительному изменению раздражающего фактора, или иначе: если раздражение увеличивается в геометрической прогрессии, то восприятие (ощущение) возрастает в арифметической прогрессии. Другими словами, наши органы чувств, в том числе и глаза, реагируют не на абсолютное, а на относительное изменение внешнего раздражителя: если к двум светящимся электролампам одинаковой мощности подключить еще две такие же, то мы уверенно зафиксируем увеличение освещенности, но если эти две электролампы добавят свой свет к излучению десяти аналогичных ламп, то наши глаза почти или даже вовсе не заметят различия в освещении.

Известно, что законы природы действуют объективно, т. е. независимо от сознания человека. Именно поэтому Гиппарх, не имея ни малейшего представления о законе Вебера — Фехнера, все же создал для оценки блеска звезд шкалу звездных величин, оказавшуюся в полном соответствии с этим законом.

Обозначим через E_1 блеск звезды первой звездной величины (1^m; буква m — это символ звездной величины), через E_2 — блеск звезды второй звездной величины (2^m), через E_3 — блеск звезды 3^m и т. д. Тогда, согласно соотношению блеска звезд с различием в одну звездную величину ($\Delta m = 1^m$), можно написать:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2{,}5 = 2{,}5^{2-1};$$

$$\frac{E_2}{E_3} = 2{,}5 \text{ и } \frac{E_1}{E_3} = \frac{E_1}{E_2}\frac{E_2}{E_3} = 2{,}5^2 = 2{,}5^{3-1},$$

$$\frac{E_3}{E_4} = 2{,}5 \text{ и } \frac{E_1}{E_4} = \frac{E_1}{E_2}\frac{E_2}{E_3}\frac{E_3}{E_4} = 2{,}5^3 = 2{,}5^{4-1} \text{ и т. д.,}$$

---

[1] Первый звездный фотометр изобретен в 1836 г английским астрономом Джоном Гершелем (1792—1871).

т. е. отношение блеска двух звезд всегда определяется разностью их звездных величин, причем изменение блеска (раздражающего глаз) в геометрической прогрессии сопровождается изменением ощущения (звездной величины) в арифметической прогрессии.

Аналогично, различие в блеске двух звезд 1^m и 6^m составляет $\frac{E_1}{E_6} = 2{,}5^{6-1} = 2{,}5^5 = 97{,}66$, т е. близко к 100. Поэтому в 1856 г английский астроном Н. Р. Погсон (1829—1891) предложил условие, принятое сейчас в астрономии разность в пять звездных величин ($\Delta m = 5^m$) всегда означает различие блеска ровно в 100 раз.

Принимая $100 = x^5$, найдем $\lg 100 = 2 = 5 \lg x$, откуда $\lg x = 0{,}4$ и $x = 2{,}512$. Следовательно, блеск двух объектов с произвольными звездными величинами m_1 и m_2 различается в

$$\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 2{,}512^{m_2 - m_1} \text{ раз},$$

и это различие вычисляется по формуле

$$\lg \frac{E_{m_1}}{E_{m_2}} = 0{,}4(m_2 - m_1), \tag{1 1}$$

называемой формулой Погсона.

Оценки блеска небесных светил звездными величинами оказались настолько удобными, что до сих пор применяются в астрономии. Современная астрономия располагает чувствительнейшими фотометрами, позволяющими измерять даже незначительные различия в блеске. Поэтому блеск подавляющего большинства светил выражается дробными числами с точностью до $0{,}^m1$ и даже до $0{,}^m01$, например: $3^m{,}8$; $4{,}^m6$; $5{,}^m07$; $6{,}^m29$ и т д.

Точные измерения выявили несколько звезд с блеском, превышающим первую звездную величину; такие звезды считаются звездами нулевой звездной величины (0^m). Еще более ярким светилам приписывается отрицательная звездная величина. Так, например, блеск звезды Сириуса (α Большого Пса) равен $-1{,}^m58$, блеск Венеры достигает $-4{,}^m4$, блеск полной Луны близок к $-12{,}^m7$, а блеск Солнца — даже $-26{,}^m8$. Но нужно твердо помнить, что звездная величина характеризует лишь блеск небесного светила, а отнюдь не его угловые (видимые) или линейные размеры. Тут же отметим, что на всем небе имеется только 24 звезды нулевой (0^m) и первой (1^m) звездной величины, из которых 15 звезд видно в СССР, а из 69 звезд второй звездной величины (2^m) всего неба в СССР видно 54 звезды.

Формула Погсона позволяет вычислить освещенность земной поверхности небесными объектами. Так, обозначив звездную величину Солнца через $m_\odot = -26{,}^m8$ ($\odot$ — знак Солнца), а звездную величину полной Луны через $m_☾ = -12{,}^m7$ (☾ — знак Луны), найдем:

$$\lg \frac{E_\odot}{E_☾} = 0{,}4[-12^m{,}7 - (-26^m{,}8)] = 0{,}4 \cdot 14^m{,}1 = 5{,}^m64$$

и

$$\frac{E_\odot}{E_☾} = 4{,}37 \cdot 10^5,$$

т е. Солнце освещает Землю в 437 тыс. раз сильнее полной Луны.

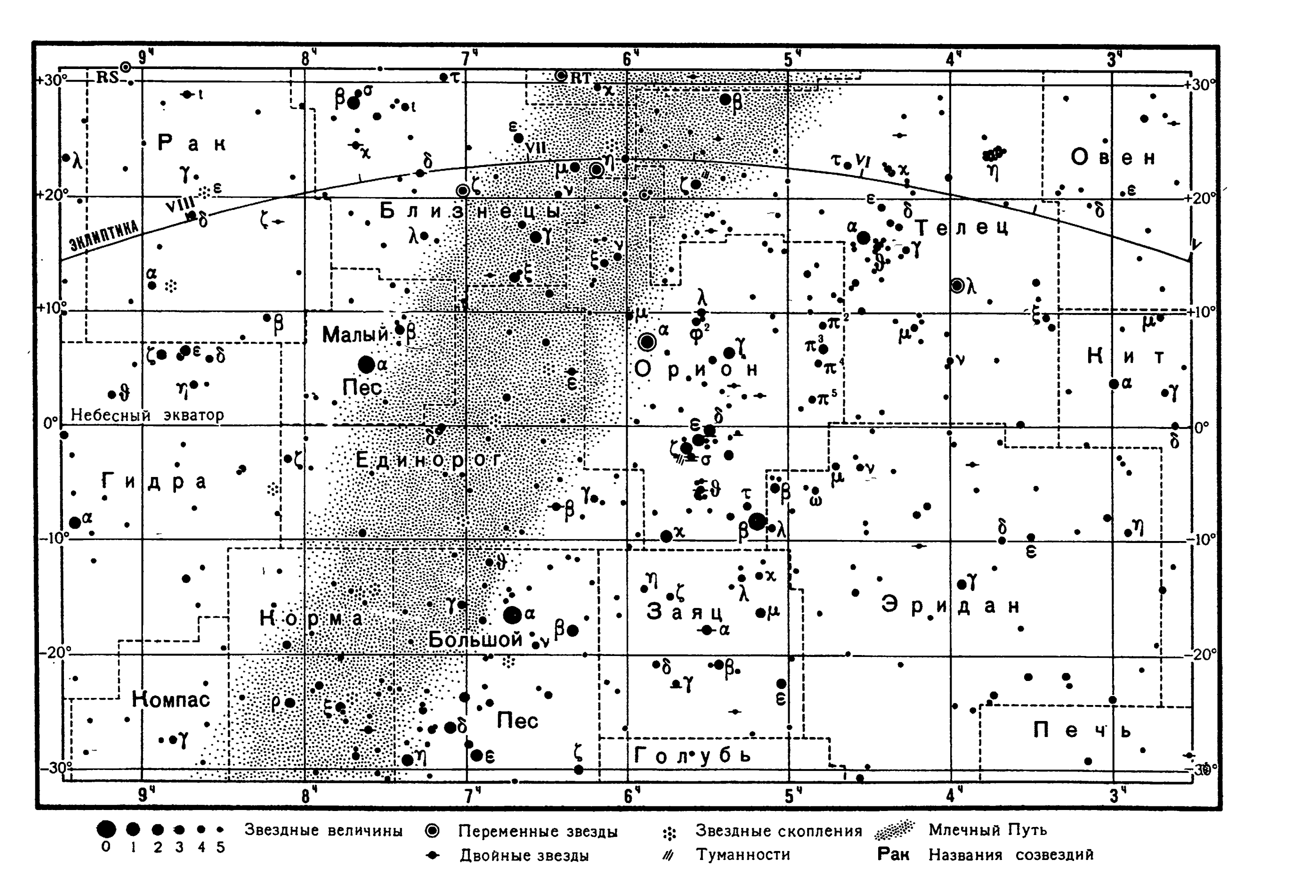


Рис. 4. Звездная карта.

Весьма полезно порешать аналогичные задачи на соотношение блеска небесных светил, заимствуя их звездные величины из «Школьного астрономического календаря»[1] или из других источников.

Из формулы Погсона видно, что разность в одну звездную величину ($m_2 - m_1 = 1^m$) означает различие в блеске в 2,512 раза, от которого приближенное значение 2,5 отличается всего лишь на 0,5%, что характеризует высокую чувствительность нашего зрения и позволяет широко применять глазомерные оценки блеска звезд, если требуемая точность не превышает $0{,}^m1$.

ЗВЕЗДНЫЕ КАРТЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ЗВЕЗД

Для ориентировки по звездному небу составляют звездные карты и вводят обозначения звезд. На протяжении нескольких столетий на звездных картах изображали не только звезды, но и рисунки созвездий и каждой звезде давали имя. Когда же число изображаемых на картах звезд увеличилось настолько, что запоминание их названий стало делом трудным, перешли к буквенным обозначениям. Впервые звезды были обозначены буквами греческого алфавита в звездном атласе «Уранометрия» Байера. В XVIII в. с карт звездных атласов исчезли рисунки созвездий, затрудняющие отыскание звезд, и постепенно звездные карты приняли современный вид (рис. 4).

На полях звездных карт проставляют обозначения звездных величин, по которым можно судить о приближенном значении блеска звезд с точностью[2] до 1^m или $0{,}^m5$. Особыми знаками обозначены переменные звезды (меняющие свой блеск), двойные и кратные звезды, тесные группы звезд (звездные скопления) и туманности.

Буквенные обозначения звезд в созвездиях легко запоминаются. В большинстве созвездий более яркие звезды обозначены более ранними буквами греческого алфавита. Однако имеются и исключения. Например, семь главных звезд Большой Медведицы обозначены буквами не в порядке уменьшения их блеска, а по контуру ковша, образованного этими звездами (см. рис. 1); в созвездии Близнецов звезда β (Поллукс) ярче звезды α (Кастор); в созвездии Дракона самая яркая звезда обозначена буквой γ, а звезда α — лишь седьмая по блеску, и т. д.

Собственные названия звезд почти исчезли из употребления и сохранены лишь для небольшого числа наиболее ярких звезд. Теперь даже не все астрономы знают, что каждая из семи ярких звезд Большой Медведицы имеет имя: Дубхе (α), Мерак (β), Фекда (γ), Мегрец (δ), Алиот (ε), Мицар (ζ) и Бенетнаш (η), а звезда β Льва именуется Денеболой. Но зато не только астрономы, но и многие любители астрономии по-прежнему называют Вегой звезду α Лиры, Денебом — звезду α Лебедя, Арктуром — звезду α Волопаса, Капеллой — звезду α Возничего, Сириусом — звезду α Большого Пса и т. д.

Солнце, Луна и планеты на звездных картах не изображены, так как они перемещаются по созвездиям. Однако видимый годовой путь Солнца, называе-

---

[1] «Школьный астрономический календарь» издается ежегодно издательством «Просвещение» на очередной учебный год.

[2] Более точные значения блеска приводятся в списках звезд, называемых звездными каталогами.

мый эклиптикой, на картах показан, и по нему можно указать положение Солнца на небе в любой день года. Так, на рисунке 4 положение Солнца на эклиптике в начале каждого месяца отмечено римскими цифрами.

Кроме небесных объектов, на звездных картах нанесена сетка небесных координат, смысл которой станет ясен из последующего изложения. Наиболее простые и подходящие для изучения неба звездные карты имеются в Звездном атласе академика А. А. Михайлова. Этот атлас позволяет достаточно полно изучить звездное небо и проводить астрономические наблюдения. Для общей ориентировки по небу и определения вида звездного неба на любой момент суток создают подвижные карты, помогающие решать простейшие астрономические задачи. Такая карта прилагается к школьному учебнику по астрономии и к «Школьному астрономическому календарю», где дается описание ее использования.

Изучение звездного неба лучше всего начинать с созвездия Большой Медведицы, которое на территории СССР всегда находится над горизонтом. Весенними вечерами это созвездие видно почти над головой наблюдателя, летом оно расположено сравнительно высоко в северо-западной области неба, осенью — низко над северной стороной горизонта, в долгие зимние вечера оно видно там же, а к полуночи поднимается на северо-востоке.

Поместив перед собой звездную карту таким образом, чтобы изображение созвездия Большой Медведицы было идентично его расположению на небе, следует прежде всего отыскать все семь ярких звезд ковша этого созвездия. Затем, мысленно проводя на карте и на небе прямые линии через каждую пару звезд Большой Медведицы, найти ближайшие к ней созвездия с яркими звездами, к которым эти линии направлены. Так, прямая линия, проведенная через звезды δ и γ Большой Медведицы, укажет созвездие Льва, находящееся под ковшом Большой Медведицы и имеющее вид трапеции, в правом нижнем углу которой расположена яркая звезда ($1^m,3$) Регул (α Льва). Прямая линия, проведенная через звезды δ и α Большой Медведицы, покажет созвездие Возничего с яркой звездой ($0^m,2$) Капеллой (α Возничего), а прямая, проведенная через звезды ζ и η ручки ковша, пройдет через соседнее созвездие Волопаса, вблизи его яркой звезды ($0^m,2$) Арктура (α Волопаса).

Изучив таким образом ближайшие к Большой Медведице созвездия с яркими звездами, можно уже от них переходить и к другим созвездиям, используя те же приемы. Что касается контуров созвездий, очерчиваемых по хорошо заметным звездам, то они весьма условны, и хотя многие общеприняты (рис. 5),

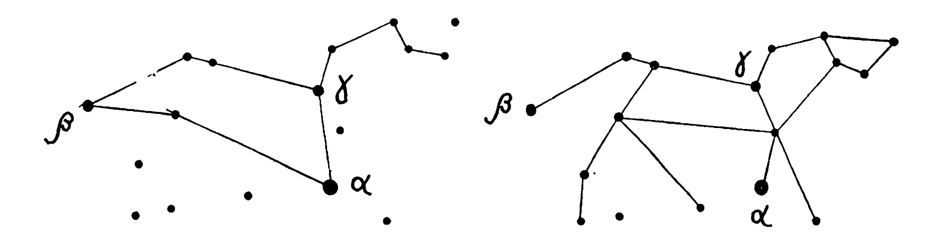


Рис. 5. Общепринятый контур созвездия Льва.

Рис. 6. Контур созвездия Льва по Рею.

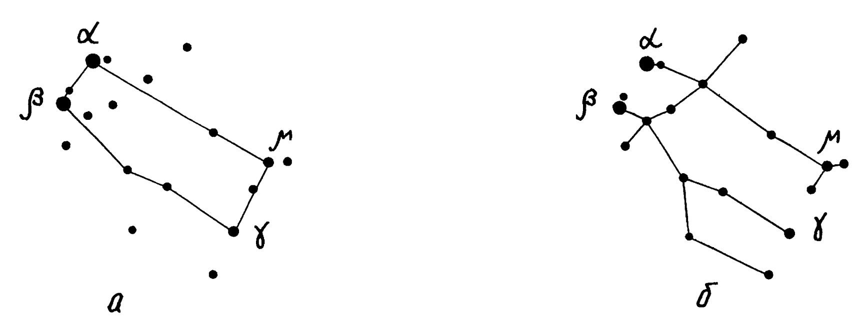


Рис. 7. Контур созвездия Близнецов: а) общепринятый, б) по Рею.

но вполне возможны и иные, в частности те, которые приведены в книге Г. Рея «Звезды» (М., 1969) и в виде примеров показаны на рисунках 6 и 7 Может быть, читатели и сами придумают оригинальные и более подходящие контуры созвездий, не меняя, конечно, их утвержденных границ.

Подробное описание созвездий и находящихся в них небесных объектов можно найти в интересной книге Ф. Ю. Зигеля «Сокровища звездного неба» (М., 1976):

ВРАЩЕНИЕ НЕБЕСНОГО СВОДА

При наблюдении звездного неба легко обнаружить его медленное вращение. Для этого лучше всего заметить в южной стороне неба (там, где Солнце бывает вблизи полудня) сравнительно яркую звезду и выбрать для ее наблюдений такое место, чтобы звезда оказалась закрытой (экранированной) каким-либо высоким предметом — деревом, мачтой, телеграфным столбом и др. Уже через 1—2 мин звезда появится из-за предмета, перемещаясь слева направо, с востока к западу, т. е. в направлении вращения часовой стрелки. Более впечатляющим является аналогичное наблюдение Луны.

Подобно Солнцу, восходящему утром и заходящему вечером, созвездия поднимаются над горизонтом под некоторым углом к нему в восточной стороне неба и под тем же углом опускаются к горизонту в западной стороне. Одни созвездия восходят и заходят, другие видны всю ночь — никогда не заходят за горизонт, но ни одна звезда не обгоняет другую, и вид созвездий, а также их взаимное расположение не меняются. Все небо вращается как единое целое, совершая один оборот за сутки, поэтому его вращение называется суточным. Единственной неподвижной звездой невооруженному глазу представляется Полярная звезда (α Малой Медведицы), занимающая неизменное положение над горизонтом.

Суточное вращение неба привело астрономов древности к мысли о неподвижности Земли и о вращении вокруг нее небесной прозрачной сферы вместе со всеми светилами. Но в астрономии все время приходится отличать видимые явления от действительных, реальность которых устанавливается посредством проведения опытов или специальных наблюдений и строгого их анализа на физико-математической основе.

Наблюдаемое суточное вращение неба — явление чисто кажущееся, вызывае-

мое действительным вращением Земли с запада к востоку. Очевидно, это утверждение требует доказательств. Некоторые полагают, что таким доказательством служит смена дня и ночи. Это глубокое заблуждение, так как смену дня и ночи можно объяснить, считая Землю неподвижной, а Солнце — вращающимся вместе с небом вокруг Земли, т. е. так, как это делалось в древности. Явление же, которое допускает различное толкование, не может считаться доказательством. Смена дня и ночи является не доказательством, а только следствием вращения Земли.

Впервые убедительное доказательство вращения Земли дал в 1851 г. французский физик Фуко (1819—1868), выполнив опыт[1] с массивным свободно качающимся маятником длиной 67 м под сводами Парижского Пантеона[2] и правильно объяснив отклонение плоскости качания суточным вращением Земли. Ныне в шарообразной форме Земли и ее вращении никто не сомневается. Превосходные фотографии Земли, полученные из космического пространства, наглядно подтверждают и то и другое. Первые цветные фотографии Земли выполнены 8 августа 1969 г. советской автоматической межпланетной станцией «Зонд-7», а затем были многократно повторены другими космическими аппаратами.

Полезно запомнить, что направление вращения Земли (с запада к востоку) называется в астрономии прямым, а противоположное — обратным.

НЕБЕСНАЯ СФЕРА И ЕЕ СУТОЧНОЕ ВРАЩЕНИЕ

Из-за огромной удаленности небесных светил от Земли все они представляются нам находящимися на одинаковом, неопределенном расстоянии. Чтобы это хорошо осознать, достаточно иметь в виду, что средний радиус Земли равен 6371 км, расстояние от нее до Луны составляет 384 400 км, до Солнца — около 150 млн. км, а до самой близкой звезды, α Центавра, — в 275 000 раз дальше, чем до Солнца. Глаза же человеческие, в самом лучшем случае, могут различать расстояния лишь в пределах до 2 км. Далее все предметы представляются нам одинаково удаленными. Этим и объясняется кажущееся расположение всех небесных светил на внутренней поверхности огромной сферы.

Для решения многих практических задач расстояния до небесных тел не играют роли, важно лишь их видимое расположение на небе. Поэтому, хотя в природе небесной сферы и не существует, астрономы пользуются ею как математическим средством определения видимых положений и видимых движений небесных тел.

Небесной сферой называется воображаемая сфера произвольного радиуса, центром которой является глаз наблюдателя. Чтобы получить правильное представление о небесной сфере, лучше всего считать радиус сколь угодно большим, превышающим расстояние до самого далекого из известных нам небесных объектов. Считать радиус небесной сферы бесконечно большим ($R = \infty$) нельзя: в этом случае кривизна поверхности (т е. величина, обратная радиусу) будет равна нулю и, следовательно, сферическая поверхность должна быть заменена плоской, что противоречит наблюдениям.

---

[1] Опыт Фуко описан в учебниках физики и астрономии и поэтому здесь не разъясняется.

[2] Пантеон — монументальное здание для захоронения праха великих людей.

Может возникнуть законный вопрос: сколько небесных сфер можно себе представить, если у каждого человека по два глаза, а на Земле проживает свыше 4 млрд. человек? Оказывается, представить можно только одну небесную сферу, и вот почему. Если представить их множество, то все равно все они сольются в одну из-за ничтожно малых размеров Земли в сравнении с расстояниями даже до ближайших звезд. Для наглядности изобразим Землю (диаметр которой около 12 750 км) дробинкой диаметром 1 мм и поместим ее в центре Москвы. Тогда крокетный шар, изображающий наиболее близкую звезду α Центавра, нам придется разместить на расстоянии в 3200 км от Москвы, т. е. примерно в Красноярске, так как расстояние до α Центавра в 3,2 млрд. ($3{,}2 \cdot 10^9$) раз больше диаметра Земли. При таких соотношениях размеров совершенно безразлично, из какой точки миллиметровой дробинки наблюдать крокетный шар в Красноярске: все равно он будет виден по параллельным направлениям.

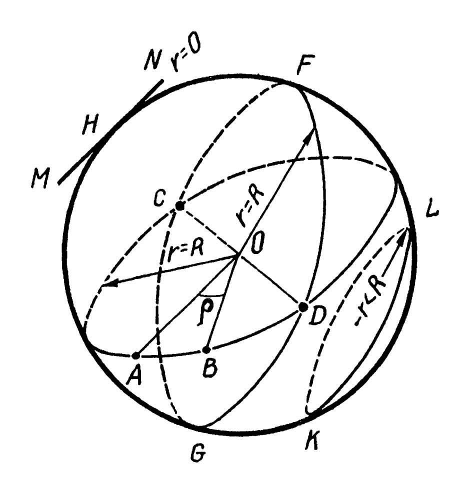


Рис. 8. Круги небесной сферы. Большие круги *CABD* и *CFDG* пересекаются по диаметру *CD*. Малый круг *KL* имеет радиус $r < R$. Плоскость *MHN* касается сферы в точке *H* (радиус $r = 0$). Угловое расстояние между точками *A* и *B* равно ρ.

Приведенный пример иллюстрирует очень важное, особое свойство небесной сферы: из разных точек земной поверхности одна и та же точка небесной сферы (одна и та же звезда) видна по параллельным направлениям. Этим особым свойством небесной сферы мы будем неоднократно пользоваться.

Кроме того, небесная сфера обладает всеми свойствами обычной геометрической сферы. Перечислим те из них, которые понадобятся нам в дальнейшем (рис. 8):

1 Плоскости, проведенные через центр сферы (*O*), пересекают ее по большим кругам, радиусы которых равны радиусу сферы ($r = R$)[1].

2. Каждый большой круг делит сферу на две полусферы (на два полушария).

3. Через две произвольные точки (*A* и *B*) сферы можно провести только один большой круг.

4. Два больших круга всегда пересекаются в двух диаметрально противоположных точках (*C* и *D*).

5. Плоскости, секущие сферу вне ее центра, образуют на ней малые круги, радиусы которых меньше радиуса сферы ($r < R$).

Все измерения на небесной сфере, будь то диаметры небесных светил, видимые расстояния между звездами или между произвольными точками небесной сферы, проводятся только в угловых или дуговых единицах измерения — градусах, минутах и секундах дуги. Например, расстояние между точками *A* и *B* небесной сферы (см. рис. 8), изображаемое на ней дугой *AB*, измеряется цент-

[1] В астрономии круги отождествляются с окружностями.

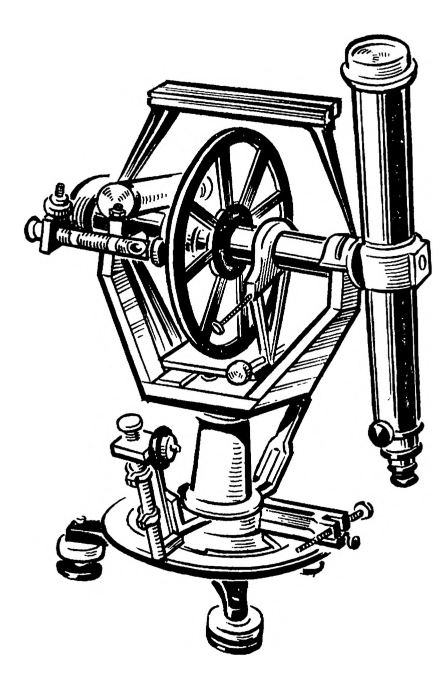


Рис. 9. Простейший универсальный инструмент.

ральным углом ρ между направлениями на эти точки из центра *O* небесной сферы, в котором находится наблюдатель. Поскольку центральные углы всегда лежат в плоскостях больших кругов и стягиваются их дугами, то дуги больших кругов являются наикратчайшими расстояниями между точками небесной сферы (они аналогичны отрезкам прямых линий на плоскости).

Астрономы измеряют угловые расстояния с высокой точностью, используя для этого специальные оптические инструменты, снабженные кругами с точной градусной шкалой. Наиболее простая модель одного из них, называемого универсальным инструментом, показана на рисунке 9. Аналогичные инструменты, называемые теодолитами, сейчас имеются во многих школах.

Познакомимся с основными точками и кругами небесной сферы. Во многих задачах астрономии можно принимать Землю за идеальный шар. Тогда в любом месте *O* земной поверхности направление отвесной (или вертикальной) линии *COZ* совпадает с направлением земного радиуса *CO* в этом месте (рис. 10, *а*). Точка *O* — центр небесной сферы. Отвесная линия *ZOZ′* (рис. 10, *б*) пересекается с небесной сферой в двух диаметрально противоположных точках, называемых зенитом *Z* и надиром *Z′*. Зенит находится точно над головой наблюдателя, а надир — под его ногами и скрыт земной поверхностью.

Плоскость, проведенная через центр небесной сферы перпендикулярно к отвесной линии, образует в пересечении с небесной сферой большой круг *NESW*, называемый истинным (или математическим) горизонтом (от греческого «горизонтос» — разграничивающий). Истинный горизонт делит небесную сферу на две полусферы, одна из которых находится над ним и доступна наблюдениям, а другая не видна, поскольку скрыта земной поверхностью. В вершине видимой полусферы лежит зенит *Z*, а в вершине невидимой — надир *Z′*.

Истинный горизонт нельзя смешивать с видимым горизонтом. Первый находится на небесной сфере и является большим кругом, второй лежит на земной поверхности и на пересеченной местности имеет самую разнообразную форму. Поэтому истинный горизонт считается границей, ниже которой светила не видны. В моменты своего восхода и захода светила считаются находящимися на истинном горизонте, а при необходимости вносятся поправки за профиль видимого горизонта.

Особое свойство небесной сферы (см. с. 15) позволяет считать плоскость истинного горизонта касательной к земной поверхности в месте наблюдения.

Так как суточное вращение небесной сферы является отражением вращения Земли, то оно происходит тоже вокруг земной оси, но в обратном направлении, т е. с востока к западу. Диаметр *POP'* небесной сферы, вокруг которого она вращается, называется осью мира (см. рис. 10). В силу особого свойства небесной сферы ось мира проходит через глаз наблюдателя (центр *O* небесной сферы) и параллельна земной оси вращения *pp'*, проходящей через географические полосы Земли.

Точки пересечения оси мира с небесной сферой называются полюсами мира (от греческого «полос» — небесная ось). Они представляют собой точки небесной сферы, в которых с ней пересекается продолженная в обе стороны ось вращения Земли. Северный полюс мира *P* лежит над горизонтом северного земного полушария. Так как в нашу эпоху земная ось вращения чисто случайно направлена в сторону сравнительно яркой звезды α Малой Медведицы ($2^m{,}14$), то эта звезда находится на небе вблизи северного полюса мира, на расстоянии около 1° (точнее, 0°51′) от него, и именно поэтому называется Полярной звездой. Южный полюс мира *P'* находится над горизонтом южного земного полушария, в созвездии Октанта, и вблизи него нет ярких звезд. Из северного полушария Земли южный полюс мира не виден.

Большой круг *QQ'* небесной сферы (см. рис. 10), плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется небесным экватором (от латинского *aequator* — уравниватель). По существу, он образован на небесной сфере пересечением с нею плоскости земного экватора *qq'*, которая опять-таки, по особому свойству небесной сферы, проходит через ее центр *O* (глаз наблюдателя). Небесный экватор делит небесную сферу на две небесные полусферы (на два небесных полушария) — северную и южную. В вершине северного небесного полушария лежит северный полюс мира *P*, а в вершине южного небесного полушария — южный полюс мира *P'*.

Небесный экватор проходит по созвездиям Рыб, Кита, Ориона, Единорога, Секстана, Девы, Змееносца, Змеи и Орла, из которых только красавец Орион

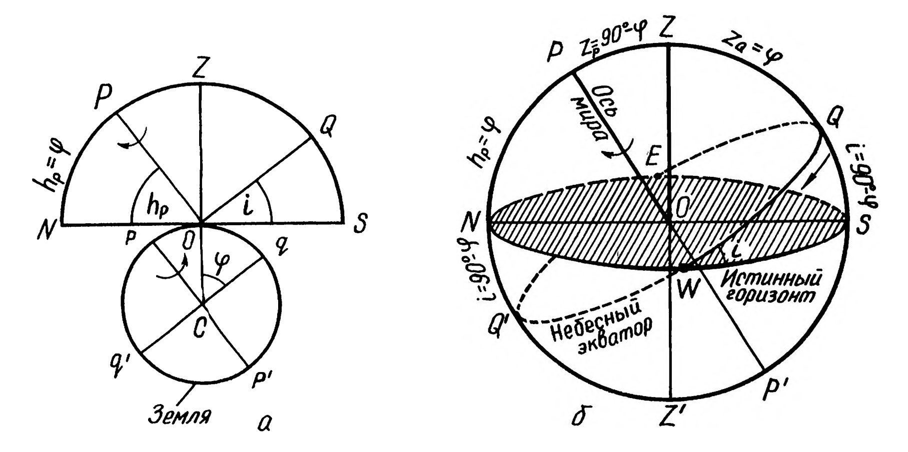


Рис. 10. Основные элементы небесной сферы. Изогнутые стрелки показывают направления суточного вращения Земли и небесной сферы.

состоит из ярких звезд и бросается в глаза, в созвездиях Девы и Орла имеется лишь по одной яркой звезде — Спика (α Девы) и Альтаир (α Орла); остальные экваториальные созвездия состоят из более слабых звезд и не выделяются на общем фоне звездного неба.

Согласно свойству больших кругов (с. 15), небесный экватор пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках, называемых точками востока E и запада W (см. рис. 10, *б*). В точке востока небесный экватор поднимается над истинным горизонтом, а в точке запада опускается за него.

Большой круг небесной сферы, проходящий через полюсы мира, зенит и надир (круг $PZSP'Z'N$), называется небесным меридианом. В его плоскости лежат ось мира и отвесная линия. Небесный меридиан пересекается с истинным горизонтом в двух диаметрально противоположных точках — точке юга S и точке севера N, которые отстоят от точек востока E и запада W ровно на 90°

Диаметр небесной сферы NOS, проходящий через точки севера и юга (по нему плоскость истинного горизонта пересекается с плоскостью небесного меридиана), называется полуденной линией, так как в полдень Солнце бывает вблизи небесного меридиана, откуда он и получил свое название (от латинского *meridianus* — полуденный).

Небесный меридиан делит небесную сферу на восточную и западную полусферы. В суточном вращении небесной сферы все светила, находящиеся в восточной полусфере, поднимаются над истинным горизонтом, а в западной полусфере — опускаются к нему. Сам небесный меридиан делится полюсами мира на две половины: его южная половина $PZSP'$ проходит от северного полюса мира P через зенит Z и точку юга S, а северная половина $PNZ'P'$ — от северного полюса мира P через точку севера N и надир Z' к южному полюсу мира P'

Легко видеть (см. рис. 10, *а*), что небесный меридиан образован на небесной сфере плоскостью земного (географического) меридиана ($pOqp'$), на котором находится наблюдатель O. Поэтому все наблюдатели, находящиеся на одном географическом меридиане, имеют общий небесный меридиан, а плоскости небесных меридианов наблюдателей, находящихся на различных географических меридианах, расположены под углом друг к другу, т. е. направлены в разные области пространства.



Рис. 11 Фотография области неба вокруг Полярной звезды.

Перечисленные элементы небесной сферы, кроме небесного экватора, неподвижны относительно наблюдателя и не участвуют в суточном вращении небесной сферы. Небесный же экватор вращается вместе с небесной сферой, скользя в неподвижных точках востока и запада.

Все остальные точки небесной сферы и небесные светила участвуют в ее суточном вращении, перемещаясь по малым кругам — небесным, или суточным, параллелям, плоскости которых

параллельны плоскости небесного экватора. Чтобы убедиться в этом, достаточно сфотографировать неподвижной фотокамерой область неба вокруг Полярной звезды: на фотоснимке, полученном с экспозицией около 90 мин, четко видны концентрические дуги, оставленные светом звезд, перемещающихся по небесным параллелям (рис. 11). Все эти дуги имеют общий неподвижный центр кривизны — северный полюс мира, положение которого легко определяется по фотографии. Небольшая яркая дуга вблизи северного полюса мира является следом, оставленным Полярной звездой. Невооруженному глазу, без соответствующих измерений, суточное вращение Полярной звезды незаметно, и она кажется неподвижной.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДИМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ НЕБЕСНЫХ СВЕТИЛ. НЕБЕСНЫЕ КООРДИНАТЫ

Опираясь на основные точки и круги небесной сферы, можно с большой точностью определять видимые положения небесных светил числовыми величинами, называемыми небесными или сферическими координатами.

Из географии известны географические координаты — географическая долгота и географическая широта, определяющие положение точек на земной поверхности. В сетке географических координат через географические полюсы Земли проводят большие полукруги — географические меридианы, а параллельно плоскости земного экватора — малые круги, географические параллели (рис. 12). От Гринвичского[1] географического меридиана, принятого за начальный, или нулевой, вдоль экватора отсчитывается географическая долгота λ, а от экватора, вдоль меридианов, в направлении географических полюсов отсчитывается географическая широта φ, которая к северу положительна (от 0 до $+90°$), а к югу отрицательна (от 0 до $-90°$).

В астрономии географическую долготу отсчитывают только в одном направлении — к востоку от Гринвича[2], в пределах от 0 до 360°, а чаще всего — в единицах времени, от 0 до 24 часов, причем обозначение часов (ч), минут времени (м) и секунд времени (с) проставляют справа вверху чисел, подобно градусам, т. е. так: от 0 до $24^{ч}$. Перевод угловых единиц в единицы времени производят из расчета, что

$$360° = 24^{ч};\ 1^{ч} = 15° = 60^{м},$$
$$1° = 4^{м} = 60';\ 1^{м} = 15' = 60^{с}$$
$$1' = 4^{с} = 60'';\ 1^{с} = 15''$$

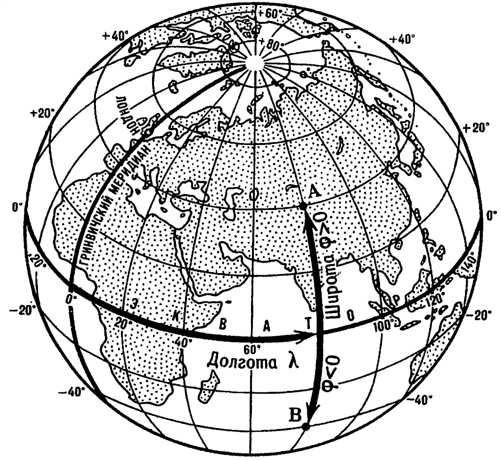


Рис. 12. Сетка географических координат.

[1] Гринвич находится в Англии, на окраине Лондона; там имеется известная астрономическая обсерватория.

[2] Астрономы западных стран часто отсчитывают географическую долготу к западу от Гринвича, что весьма неудобно для счета времени.

По таблице 1 (с. 155) легко переходить от одних единиц к другим.

Сетку географических координат на глобусах и географических картах видел каждый. Но видел ли ее кто-нибудь непосредственно на земной поверхности? Конечно, никто, поскольку эта сетка — чисто математическое построение. И тем не менее она широко используется в практической деятельности человеческого общества: по ней прокладывают наземные, морские и воздушные трассы, отмечают географические координаты населенных пунктов и мест залежей полезных ископаемых, создают географические и топографические карты и т д. На земной поверхности не проведены ни экватор, ни тропики, ни полярные круги, но их положение хорошо известно, и они отмечены искусственными указателями. Вот здесь мы и ответим на поставленный выше вопрос так: географическая сетка на земной поверхности незримо существует, и создана она астрономическими наблюдениями; географические координаты на местности до сих пор определяются только астрономическими способами, других способов пока нет.

Благодаря астрономии математическая абстракция (географическая сетка) получила реальное содержание и служит практическим нуждам человечества. Чтобы это понять, нужно подробно ознакомиться с системами астрономических (небесных) координат. Таких систем несколько, и каждая служит выполнению определенных задач. Однако принцип их построения совершенно одинаков и аналогичен принципу построения географических координат. И хотя дуги больших кругов, по которым отсчитывают небесные координаты, изображают на небесной сфере, измеряют их угломерными инструментами с земной поверхности — из центра небесной сферы.

Горизонтальная система небесных координат

Прежде всего необходимо знать, будет ли видно то или иное светило в определенный момент времени и в какой именно области неба. Решению этой задачи помогает горизонтальная система координат, построенная на истинном горизонте. Через зенит Z и надир Z' проводят большие полукруги, называемые кругами высоты или вертикалами[1] (рис. 13). Все они перпендикулярны к истинному горизонту — основному кругу этой системы координат. Параллельно плоскости истинного горизонта проводят малые круги, называемые кругами равной высоты или альмукантаратами (от арабского «куантара» — изгибать сводом).

Каждое светило M в любой момент времени обязательно находится на каком-либо круге высоты и на альмукантарате, и положение его на небе определяется двумя сферическими координатами — азимутом A и высотой h.

Азимутом ($A = Sm$) называется угловое расстояние круга высоты от точки юга S, измеряемое по истинному горизонту. Азимут обычно отсчитывают в одну сторону, по часовой стрелке (т. е. к западу, далее к северу, востоку и снова к точке юга) в пределах от 0 до 360° Но иногда его отсчитывают от точки юга в обе стороны, считая положительным к западу (от 0 до +180°) и отрицательным к востоку (от 0 до —180°).

---

[1] Кругом высоты (вертикалом) называется не полный круг, а только его половина от зенита Z до надира Z' (например, ZmZ' на рис. 13).

Высотой ($h = mM$) называется угловое расстояние от истинного горизонта, измеряемое по кругу высоты. Пределы ее измерения от 0 до $\pm 90°$. Высота светил, находящихся над истинным горизонтом, положительна ($h > 0°$), а находящихся под истинным горизонтом и поэтому невидимых (например, светило M' на рисунке 13) — отрицательна ($h < 0°$).

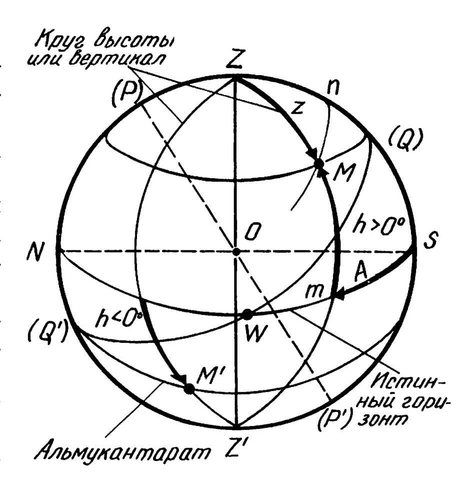


Рис. 13. Небесные горизонтальные координаты.

Поскольку угломерными инструментами значительно проще определять положение зенита, чем истинного горизонта, то вместо высоты h светил измеряют по кругу высоты их зенитное расстояние z (угловое расстояние от зенита $z = ZM$ на рисунке 13). Зенитное расстояние (заменяющее высоту) имеет пределы от 0° (зенит) до 180° (надир) и всегда положительно. Для любого светила всегда

$$z = 90° - h. \tag{1.2}$$

В суточном вращении небесной сферы светила перемещаются по небесным параллелям (например, по nM на рисунке 13), и потому на протяжении суток их горизонтальные координаты непрерывно изменяются, принимая определенные значения лишь в определенные моменты времени. Из-за этого горизонтальная система координат не подходит для построения звездных карт, но зато она позволяет заранее вычислить положения светил относительно горизонта в определенные моменты времени.

Экваториальная система координат

Для построения звездных карт и составления списков (каталогов) различных небесных объектов необходимо, чтобы их сферические координаты оставались бы неизменными на протяжении сравнительно длительных промежутков времени.

Вспомним, что географические координаты пунктов земной поверхности неизменны потому, что отсчитываются от кругов, вращающихся вместе с Землей (см. рис. 12). Аналогична и система небесных экваториальных координат, вращающаяся вместе с небесной сферой.

Основным кругом этой системы служит небесный экватор QQ' (рис. 14). Через полюсы мира проведены большие полукруги PP', называемые кругами склонения; они перпендикулярны к небесному экватору. Параллельно плоскости небесного экватора проведены малые круги — небесные (или суточные) параллели. Каждое светило M находится на каком-либо круге склонения (PmP') и на небесной параллели (nMl), и поэтому его положение определяется двумя сферическими координатами — прямым восхождением α и склонением δ.

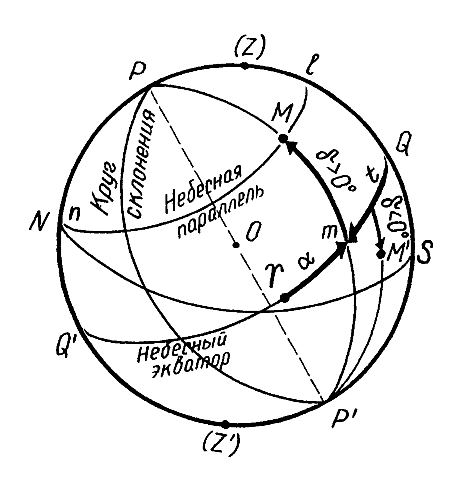


Рис. 14. Небесные экваториальные координаты.

Прямое восхождение ($\alpha = \Upsilon m$) отсчитывают по небесному экватору, от той его точки, в которой Солнце пересекает экватор весной, обычно 21 марта. Эта точка называется точкой весеннего равноденствия и обозначается специальным знаком ♈. Таким образом, прямым восхождением называется угловое расстояние круга склонения от точки весеннего равноденствия, измеряемое по небесному экватору. Прямое восхождение всегда отсчитывают в одну сторону с запада к востоку (против суточного вращения небесной сферы) и измеряют в пределах от 0 до 360°, а чаще всего — в единицах времени, от 0 до $24^ч$, что вполне допустимо, так как небесная сфера вращается равномерно.

Склонением ($\delta = mM$) называется угловое расстояние от небесного экватора, измеряемое по кругу склонения. Его отсчитывают в обе стороны от небесного экватора в пределах от 0 до $\pm 90°$ и в северном небесном полушарии принимают положительным ($\delta > 0°$), а в южном небесном полушарии — отрицательным ($\delta < 0°$). На рисунке 14 светило M имеет положительное склонение, а светило M' — отрицательное, но оно доступно наблюдениям, так как его высота положительна ($h > 0°$). Таким образом, отрицательное (южное) склонение светил отнюдь не означает, что они не видны в северном полушарии Земли: одни из них видны, другие — нет, все зависит (как видно будет дальше) от географической широты φ места наблюдения.

Так как вся сетка экваториальных координат вращается вместе с небесной сферой, то экваториальные координаты (α и δ) звезд и других не менее удаленных небесных объектов остаются неизменными на протяжении длительных промежутков времени. Эту систему координат и наносят на звездные карты.

Экваториальные координаты звезд имеют широкое практическое применение: по ним создают звездные карты и каталоги небесных объектов, определяют географические координаты мест земной поверхности, составляют географические и топографические карты, осуществляют ориентировку на суше, в море, в воздухе и в космосе, проверяют время и т. д.

Но для счета времени необходима такая небесная координата, которая в суточном вращении небесной сферы равномерно изменяется на протяжении суток, т е. измеряет угол поворота небесной сферы (или небесных светил) вокруг оси мира. Эту координату, называемую часовым углом ($t = Qm$), отсчитывают по небесному экватору от южной половины небесного меридиана ($PQSP'$) до круга склонения, причем всегда в сторону суточного вращения небесной сферы (см. рис. 14). Измеряют часовой угол в единицах времени, в пределах от 0 до $24^ч$ (реже — в угловых единицах, от 0 до 360°).

ВИД ЗВЕЗДНОГО НЕБА В РАЗЛИЧНЫХ МЕСТАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Поставим вопрос: изменяется ли высота полюса мира и Полярной звезды при перемещении наблюдателя по земной поверхности и одни ли и те же созвездия видны из различных ее мест?

Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к чертежу (рис. 15), на котором изображена Земля (C — ее центр) и на ее поверхности — три наблюдателя: на северном географическом полюсе p (географическая широта $\varphi_p = +90°$), на экваторе q (географическая широта $\varphi_q = 0°$) и на какой-то промежуточной географической широте φ (точка O). Каждый наблюдатель имеет свой зенит (Z_p, Z_q, Z_0), свой истинный горизонт (изображенный касательной) и видит только те созвездия, которые восходят над его горизонтом.

В соответствии с особым свойством небесной сферы (см. с. 15) северный полюс мира P и Полярная звезда видны по параллельным направлениям из разных мест земной поверхности. Поэтому для наблюдателя p, находящегося на северном полюсе Земли, северный полюс мира P совпадает с зенитом Z_p, высота полюса мира $h_P = +90° = \varphi_p$, и почти на той же высоте находится Полярная звезда. Наблюдатель q, находящийся на земном экваторе, увидит оба полюса мира на самом истинном горизонте, на высоте $h_P = 0° = \varphi_q$, а Полярная звезда ежесуточно будет восходить над горизонтом и заходить за него. Наблюдатель O, находящийся на географической широте φ, видит северный полюс мира на высоте $h_P = \varphi$, так как углы $NOP = h_P$ и $q'CO = \varphi$ равны между собой (их стороны взаимно перпендикулярны). Итак, в каждом месте земной поверхности высота полюса мира всегда равна географической широте этого места.

$$h_P = \varphi. \qquad (1.3)$$

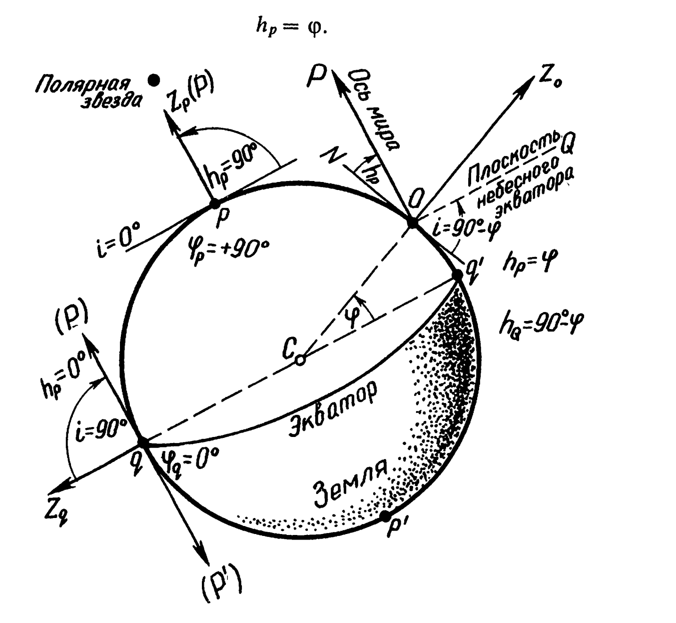


Рис. 15. Теорема о высоте полюса мира.

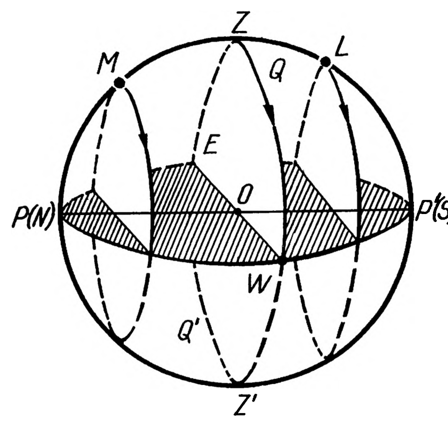


Рис. 16. Вид небесной сферы на земном экваторе.

Этот вывод известен в астрономии под названием теоремы о высоте полюса мира. Из нее следует (см. рис. 15 и 10), что в каждом месте земной поверхности небесный экватор наклонен к истинному горизонту под углом

$$i = 90° - \varphi. \qquad (1.4)$$

Под таким же углом к истинному горизонту расположены плоскости небесных параллелей и на такой же высоте

$$h_Q = i = 90° - \varphi$$

находится наивысшая точка небесного экватора (точка Q его пересечения с небесным меридианом), зенитное расстояние которой, согласно формуле (1.2),

$$z_Q = 90° - i = \varphi. \qquad (1.5)$$

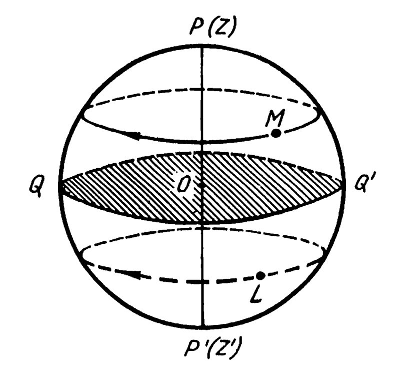


Рис. 17. Вид небесной сферы на северном географическом полюсе.

Теперь ясно, что вид звездного неба зависит от географической широты местности земной поверхности. Наблюдатель на земном экваторе ($\varphi = 0°$) видит небо таким, как показано на рисунке 16: ось мира PP' лежит в плоскости истинного горизонта и совпадает с полуденной линией NOS; северный полюс мира P совмещен с точкой севера N, южный полюс мира P' — с точкой юга S; небесный экватор QQ' проходит через зенит Z и надир Z'; небесный экватор и все небесные параллели перпендикулярны к истинному горизонту $NWSE$ и делятся им пополам. В равной степени видны обе небесные полусферы. В суточном вращении все светила, в том числе Солнце и Луна, круто (под углом в 90°) поднимаются над горизонтом, видны полсуток и круто опускаются к горизонту. Светила северной небесной полусферы (точка M, см. рис. 16) пересекают небесный меридиан к северу от зенита (над точкой севера N и под ней), а светила южной небесной полусферы (точка L, см. рис. 16) — к югу от зенита (над точкой юга S и под ней). Экваториальные созвездия Ориона, Девы, Орла и другие пересекают небесный меридиан в области зенита и надира. Ни одного незаходящего или невосходящего светила нет

Для наблюдателя на северном географическом полюсе ($\varphi = +90°$, рис. 17) ось мира PP' перпендикулярна плоскости истинного горизонта и совпадает с отвесной линией ZOZ'; северный полюс мира P совмещен с зенитом Z, южный

полюс мира P' — с надиром Z'; небесный экватор QQ' совпадает с истинным горизонтом, и поэтому понятие точек севера, востока, юга и запада отсутствует; не имеется ни небесного меридиана, ни полуденной линии. Небесные параллели параллельны плоскости истинного горизонта, и поэтому в суточном вращении неба звезды движутся параллельно горизонту, не меняя свой высоты: светила северного небесного полушария (точка M) всегда находятся над горизонтом (незаходящие светила), а светила южного небесного полушария (точка L) — под горизонтом и никогда не видны (невосходящие светила). Экваториальные созвездия Ориона, Девы, Орла и другие движутся вдоль горизонта: северная часть этих созвездий видна, а южная скрыта под горизонтом.

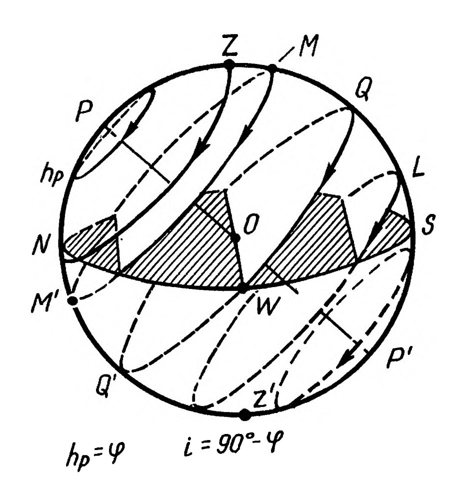


Рис. 18. Вид небесной сферы на произвольной географической широте ($h_P = \varphi$; $i = 90° - \varphi$).

На южном географическом полюсе — картина аналогичная, только с зенитом совпадает южный полюс мира, а с надиром — северный. Светила южной небесной полусферы незаходящие, а светила северной не видны (невосходящие).

В местах земной поверхности с произвольной географической широтой φ (рис. 18) наблюдениям доступно все одноименное небесное полушарие и только часть противоположного. Через зенит проходит небесная параллель, склонение которой равно географической широте местности ($\delta = \varphi$). Светила, находящиеся на небесном экваторе, полсуток пребывают над горизонтом и полсуток — под ним, т. е. не видны. Светила с северным склонением ($\delta > 0°$; точка M, см. рис. 18) видны в северном полушарии Земли бóльшую часть суток, продолжительность которой находится в прямой зависимости от их склонения. Светила с южным склонением ($\delta < 0°$; точка L, см. рис. 18) меньшую часть своего суточного пути проходят над горизонтом, а бóльшую часть — под ним.

Чем ближе к земному экватору расположено место наблюдения, тем больше видно звезд противоположной небесной полусферы и тем меньше незаходящих и невосходящих светил. Но в силу симметрии небесной сферы всегда область незаходящих светил равна области невосходящих, что в астрономии часто выражают таким правилом: круг невосходящих светил равен кругу незаходящих светил. И действительно, эти небесные параллели имеют противоположные по знаку, но численно равные склонения $\delta = (90° - \varphi)$.

Полученные выше формулы (1.3)—(1.5) дают принципиальную возможность определять географическую широту мест земной поверхности, но непосредственно их использовать для этой цели нельзя, так как ни полюс мира, ни небесный экватор на небе ничем не отмечены. Поэтому для определения географической широты используется явление, известное под названием кульминации светил, которое мы рассмотрим (как в дальнейшем и многие другие явления) только для северного полушария Земли.

КУЛЬМИНАЦИЯ СВЕТИЛ

В суточном вращении небесной сферы каждое светило дважды пересекает небесный меридиан: один раз — южную его половину (см. рис. 18, светило *M*) и второй раз (через полсуток) — северную его половину (положение *M'*).

Прохождение светила через южную половину небесного меридиана называется верхней кульминацией (от латинского *culmen* — вершина), так как в этот момент высота светила наибольшая из всех возможных значений на протяжении суток. Прохождение светила через северную половину небесного меридиана называется нижней кульминацией, при которой высота светила наименьшая.

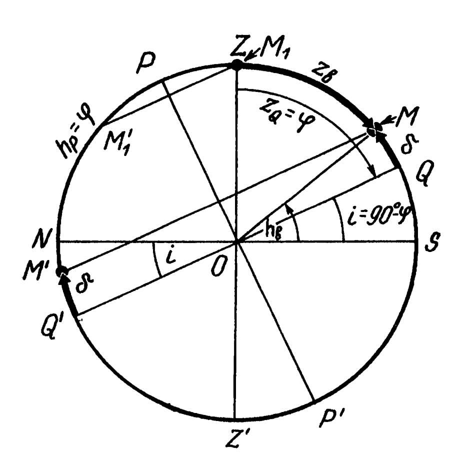


Рис. 19. Верхняя кульминация светила к югу от зенита.

Рассмотрим верхнюю кульминацию светил. На рисунке 19 изображена проекция небесной сферы на плоскость небесного меридиана: *PZSP'* —южная половина небесного меридиана, *PNZ'P'* — северная его половина, *M* — светило в верхней кульминации, его склонение $\delta = QM < \varphi$ (географической широты места наблюдения), зенитное расстояние $z_в = ZM$ и высота $h_в = SM$ (*M'* —то же светило в нижней кульминации и *MM'* — его небесная параллель).

Светило, склонение δ которого меньше географической широты φ местности, в верхней кульминации пересекает небесный меридиан к югу от зенита (над точкой юга). В этот момент зенитное расстояние светила

$$z_в = \varphi - \delta, \qquad (1.6)$$

его высота

$$h_в = 90° - z_в = \delta + (90° - \varphi), \qquad (1.7)$$

азимут $A = 0°$ и часовой угол $t = 0° = 0^ч$.

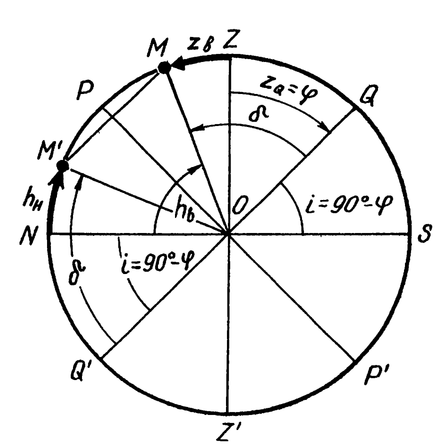


Рис. 20. Верхняя кульминация светила к северу от зенита.

При склонении светила $\delta = \varphi$ оно в верхней кульминации проходит в зените (светило M_1, рис. 19), что следует из формул (1.6) и (1.7) при подстановке в них $\delta = \varphi$; тогда $z_в = 0°$, $h_в = +90°$, часовой угол $t = 0° = 0^ч$, а азимут неопределенный.

Если же склонение светила больше географической широты места наблюдения ($\delta > \varphi$), то в верхней кульминации светило пересекает небесный мери-

диан к северу от зенита (над точкой севера), между зенитом и северным полюсом мира (рис. 20, светило M). Тогда его зенитное расстояние

$$z_в = QM - QZ = \delta - \varphi, \qquad (1.8)$$

высота

$$h_в = NM = 90° - z_в = (90° - \delta) + \varphi, \qquad (1.9)$$

азимут $A = 180°$ и часовой угол $t = 0° = 0^ч$

Нижняя кульминация светил проходит под северным полюсом мира, либо над точкой севера N (незаходящее светило), либо под ней (заходящее светило). Рассмотрим незаходящее светило M' (см. рис. 20) со склонением $\delta = Q'M'$. В нижней кульминации его высота

$$h_н = NM' = Q'M' - Q'N,$$

а так как

$$Q'N = i = 90° - \varphi,$$

то высота

$$h_н = \delta - (90° - \varphi), \qquad (1.10)$$

зенитное расстояние

$$z_н = 90° - h_н = 180° - \delta - \varphi, \qquad (1.11)$$

часовой угол $t = 180° = 12^ч$ и азимут $A = 180°$.

Равенство (1.10) позволяет сразу определить, заходит ли светило в данном месте земной поверхности или же является незаходящим. В самом деле, если $\delta < +(90° - \varphi)$, то $h_н < 0°$ (высота отрицательна) и, следовательно, светило заходящее. Если же $\delta \geqslant +(90° - \varphi)$, то $h_н \geqslant 0°$ и светило незаходящее, так как $h_н$ — это его наименьшая высота. Из правила равенства кругов незаходящих и невосходящих светил (см. с. 25) следует, что невосходящие светила имеют склонение[1] $\delta < -(90° - \varphi)$.

В виде примера найдем склонение звезд, доступных наблюдениям в Одессе ($\varphi = +46°29'$). Все звезды северного небесного полушария, имеющие склонение $\delta \geqslant +(90° - 46°29')$, т. е. $\delta \geqslant +43°31'$, не заходят за горизонт к ним относятся звезды Большой Медведицы, Малой Медведицы, Кассиопеи. Никогда не видны в Одессе южные звезды со склонением $\delta < -43°31'$. Звезды со склонением $-43°31' < \delta < +43°31'$ восходят и заходят. Это созвездия Лиры, Орла, Льва, Девы, Ориона и многие другие. Звезды же со склонением, близким к $\varphi = +46°29'$, например Капелла (α Возничего), Денеб (α Лебедя), Мирфак (α Персея), кульминируют вблизи зенита.

Предлагаем читателям самим вычислить для своей местности условия видимости небесных объектов, заимствуя их склонение из «Школьного астрономического календаря» или из других источников, и проверить вычисления наблюдениями.

---

[1] Абсолютное, численное значение $\delta > (90° - \varphi)$, но знак противоположный.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКЛОНЕНИЯ СВЕТИЛ И ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ШИРОТЫ МЕСТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Явления кульминаций звезд широко используются для практического определения их экваториальных координат и географических координат мест земной поверхности. Экваториальные координаты звезд определяют в специальных учреждениях, называемых астрономическими обсерваториями (от латинского *observare* — наблюдать). Одна из таких крупнейших астрономических обсерваторий находится на Пулковских высотах под Ленинградом и поэтому называется Пулковской обсерваторией (рис. 21).

Почему же эта Главная астрономическая обсерватория Академии наук СССР выстроена в северном районе и до сих пор не перенесена в южные районы страны, скажем в Крым или на Кавказ, где намного больше безоблачных ночей и воздух в горах значительно прозрачнее, чем под Ленинградом? Да потому, что одной из основных задач этой обсерватории является определение точных положений звезд, их экваториальных координат, а в северных районах имеется много незаходящих звезд.

В долгие темные зимние ночи, длящиеся под Ленинградом в разные месяцы по 13—15 ч, имеется возможность измерять зенитное расстояние многих звезд в обеих кульминациях — верхней и нижней. Для этого используют меридианные круги — оптические инструменты (рис. 22), позволяющие измерять углы с точностью до $0'',05$. Меридианные круги устанавливают строго в плоскости небесного меридиана, и устроены они так, что могут поворачиваться только в ней, откуда и получили свое название.



Рис. 21 Пулковская астрономическая обсерватория.

Измерив зенитное расстояние одной и той же звезды в верхней и (через полсуток) в нижней кульминации, вычисляют по формулам (1.6) и (1.11) склонение звезды δ и географическую широту φ места наблюдения:

$$\delta = 90° - \frac{z_н + z_в}{2}$$

и

$$\varphi = 90° - \frac{z_н - z_в}{2}.$$

Аналогичные выражения получаются при совместном решении равенств (1.8) и (1.11).

Таким образом, одновременно определяют и склонение звезды, и географическую широту астрономической обсерватории, и для этого совершенно не нужно разыскивать на небе положение воображаемого небесного экватора, а на Земле — земного экватора.

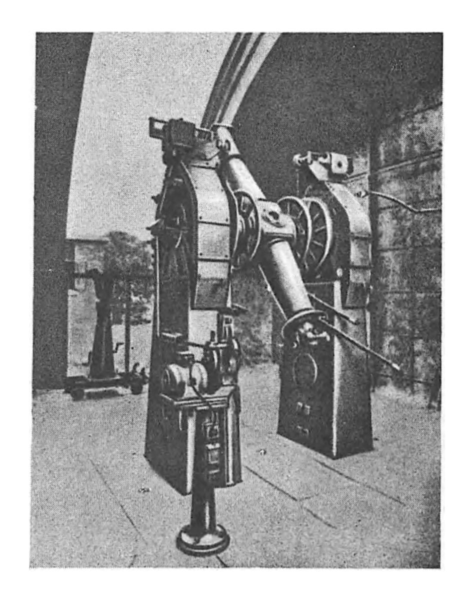


Рис. 22. Меридианный круг.

У заходящих светил измеряют зенитное расстояние только в верхней кульминации и по нему вычисляют склонение, так как географическая широта обсерватории уже определена. Найденные склонения звезд публикуют в специальных списках — звездных каталогах. Измеряя небольшими переносными инструментами (универсальными инструментами) зенитные расстояния этих звезд в верхней кульминации в различных местностях и заимствуя их склонения из звездных каталогов, астрономические экспедиции вычисляют по формуле (1.6) или (1.8) географическую широту местности.

Со способами определения прямого восхождения светил и географической долготы мы познакомимся в главе II.

ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ОБРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В северном полушарии Земли летом Солнце восходит на северо-востоке, вблизи полудня высоко поднимается над горизонтом и вечером заходит на северо-западе. Зимой же Солнце восходит на юго-востоке, его суточный путь над горизонтом низок, и заходит оно на юго-западе. Следовательно, Солнце не занимает определенного положения на небесной сфере, а, участвуя в ее суточном вращении (из-за вращения Земли), еще само перемещается на фоне звездного неба. Измерение зенитного расстояния $z_в$ Солнца в момент его верхней кульминации (называемый истинным полднем) позволяет вычислить его склонение (см. формулу 1.6):

$$\delta_{\odot} = \varphi - z_в.$$

Оказалось, что склонение Солнца на протяжении года медленно и плавно изменяется в пределах от +23°27′ до —23°27′, т. е. через каждые полгода Солнце поочередно удаляется от небесного экватора на одинаковое угловое расстояние[1] в 23°27′, пребывая примерно полгода в северной небесной полусфере и полгода — в южной.

Из наблюдений легко установить, что прямое восхождение Солнца на протяжении года тоже непрерывно изменяется, но только в одну сторону, от 0 до 360° (от 0 до $24^ч$). Для этого достаточно пронаблюдать в разные месяцы года вид звездного неба по вечерам, вскоре после захода Солнца. Так, вечером 21 марта, около $21^ч$, в западной области неба, вблизи горизонта, видно созвездие Овна, в юго-западной области — Тельца и Ориона, несколько западнее небесного меридиана — Близнецов и Малого Пса, а немного восточнее него — созвездие Льва. Через месяц в те же часы созвездия Овна уже не видно, потому что оно зашло вместе с Солнцем. Следовательно, за прошедший месяц Солнце сместилось по небу к востоку и пришло в созвездие Овна. Из-за этого и все созвездия сдвинулись к западу: Телец и Орион находятся уже вблизи горизонта, Лев проходит небесный меридиан, а на юго-востоке хорошо видно созвездие Девы. Еще через месяц в те же часы мы не увидим созвездия Тельца, так как оно зайдет вместе с Солнцем, потому что Солнце за истекший месяц опять сместилось к востоку и из созвездия Овна перешло в созвездие Тельца.

Эти наблюдения показывают, что вид звездного неба постепенно изменяется по сезонам года и регулярно повторяется в те же сезоны из года в год. Значит, помимо видимого суточного движения, Солнце еще непрерывно перемещается с запада к востоку (навстречу суточному вращению неба) по определенным созвездиям и за год (365 суток) совершает по небу один оборот (360°). Таким образом, за сутки Солнце смещается к востоку примерно на 1° или на два своих видимых диаметра, величина которого около 0°,5. Это смещение сводится к отставанию Солнца от звезд в суточном вращении неба: если Солнце взойдет вместе с какими-то звездами, то к вечеру оно отстанет от них к востоку на 0°,5 и зайдет позже них примерно на 2 мин.

Из-за ежесуточного смещения Солнца на 1° к востоку моменты восхода, кульминаций и захода звезд ежедневно наступают на $4^м$ (точнее, на $3^м56^с$) раньше, чем накануне (вспомним, что $1° = 4^м$), и за месяц сдвигаются вперед на два часа.

Видимое годовое движение Солнца происходит по большому кругу небесной сферы, называемому эклиптикой[2] Вспомнив свойства больших кругов небесной сферы (с. 15), мы уясним, что эклиптика $\mathscr{E}\mathscr{E}'$ наклонена к небесному экватору QQ' (рис. 23) и пересекается с ним под углом $\varepsilon = 23°27'$ (наклонение эклиптики). Точки пересечения эклиптики с небесным экватором называются точками равноденствий. В точке весеннего равноденствия ♈ Солнце 21 марта[3] переходит из южного небесного полушария в северное; ее экваториальные координаты $\alpha = 0° = 0^ч$, $\delta = 0°$, и от нее ведется счет прямого восхождения небесных светил. В диаметрально противоположной точке, называемой точкой осеннего равно-

---

[1] Точнее, 23°26′31″, но нам достаточна точность до 1′

[2] От греческого «эклипсис» — затмение. Когда Луна проходит вблизи эклиптики, то при определенных условиях происходят солнечные и лунные затмения (см. с. 114, 121).

[3] Иногда Солнце проходит эту точку эклиптики в смежные даты (см. с. 55).

денствия ♎, Солнце 23 сентября[1] переходит из северного небесного полушария в южное, ее экваториальные координаты $\alpha = 180° = 12^ч$ и $\delta = 0°$

Точки эклиптики, расположенные посредине между точками равноденствий и удаленные от небесного экватора на 23°27′, называются точками солнцестояний. В северной небесной полусфере лежит точка летнего солнцестояния ♋ ($\alpha = 90° = 6^ч$, $\delta = +23°27'$), которую Солнце проходит 21 июня[1], а в южной — точка зимнего солнцестояния ♑ ($\alpha = 270° = 18^ч$, $\delta = -23°27'$); Солнце ее проходит 22 декабря[1]. Точки небесной сферы, удаленные на 90° от любой точки эклиптики, называются полюсами эклиптики — северным (*П*) и южным (*П′*), а прямая линия (*ПП′*), соединяющая их, — осью эклиптики.

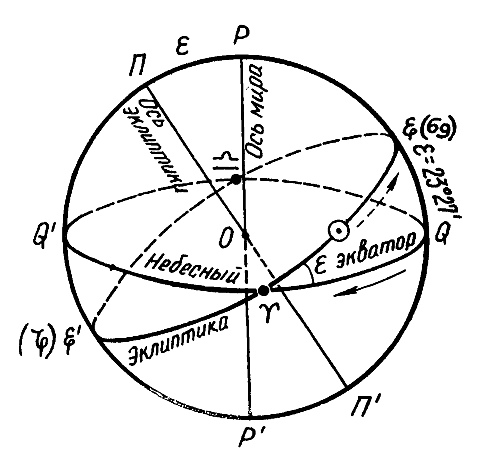


Рис. 23. Эклиптика и небесный экватор. ⟵ направление суточного вращения небесной сферы. - - → направление видимого годового движения Солнца ☉ по эклиптике.

Теперь можно показать, как практически определяют прямое восхождение Солнца. Представим себе из центра небесной сферы расположение небесного меридиана, небесного экватора и эклиптики (рис. 24) в момент верхней кульминации Солнца (☉). Измерив в этот момент зенитное расстояние Солнца $z_в$, находят по формуле (1.6) его склонение

$$\delta_☉ = \varphi - z_в,$$

и поскольку в прямоугольном сферическом треугольнике ☉Q♈ известен угол $\varepsilon = 23°27'$ (наклонение эклиптики), то прямое восхождение Солнца $\alpha_☉$ вычисляют по формуле[2]

$$\sin\alpha_☉ = \mathrm{tg}\,\delta_☉ \cdot \mathrm{ctg}\,\varepsilon. \quad (1.12)$$

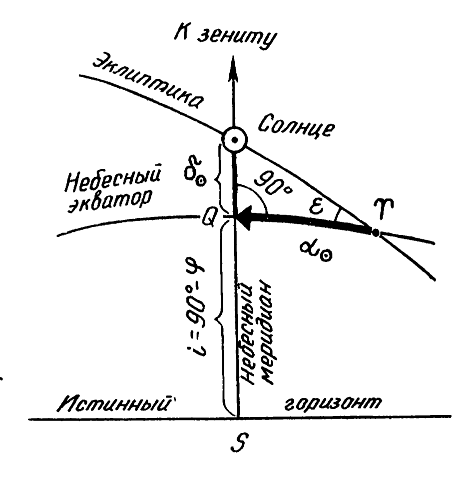


Рис. 24. Определение экваториальных координат Солнца.

Таким образом, прямое восхождение Солнца вычисляют, а не непосредственно отмеряют от воображаемой точки весеннего равноденствия, которая нужна лишь в качестве начала отсчета. Наоборот, ее положение на небе определяется прямым восхождением Солнца.

---

[1] Иногда Солнце проходит эту точку эклиптики в смежные даты (см. с 55).

[2] Эта формула выводится в разделе математики, называемом сферической тригонометрией.

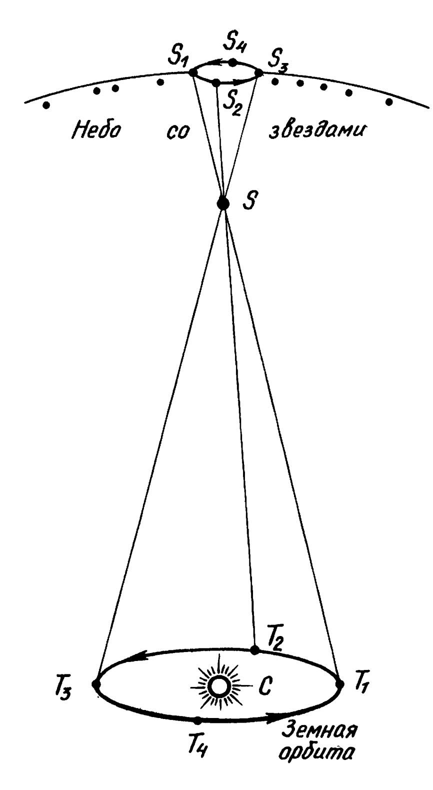


Рис. 25. Параллактическое смещение звезды.

По ежедневным значениям экваториальных координат Солнца $\alpha_\odot$ и $\delta_\odot$ нетрудно проследить его видимый годовой путь по созвездиям и нанести эклиптику на звездные карты.

Видимое годовое движение Солнца по эклиптике является следствием действительного обращения Земли вокруг Солнца. Некоторые полагают, что доказательством годового обращения Земли служит смена сезонов года. Однако это далеко не так. Смена сезонов года является следствием обращения Земли вокруг Солнца, но не доказательством, так как она в равной степени может быть объяснена годовым движением Солнца вокруг неподвижной Земли, в чем древние ученые были уверены.

В настоящее время имеется много доказательств годового обращения Земли вокруг Солнца, но мы здесь дадим только одно. Представим себе (рис. 25) путь Земли вокруг Солнца (C), называемый земной орбитой (от латинского *orbita* — колея, дорога), и множество звезд на небе, из которых одна S значительно ближе остальных и поэтому ярче их. При неподвижной Земле, например, из положения T_1 звезда S была бы видна всегда в одной и той же точке неба S_1. Но из-за обращения Земли вокруг Солнца звезда из точки T_2 земной орбиты будет видна на небе в точке S_2, из точки T_3 — в точке S_3 и так далее, т. е. на протяжении года звезда опишет на фоне слабых звезд маленький эллипс в направлении движения Земли.

Такие кажущиеся, или параллактические, смещения (от греческого слова «параллаксис» — уклонение), различные по значению, наблюдаются почти у всех сравнительно ярких звезд, но из-за их колоссального удаления настолько малы, что незаметны невооруженному глазу. Параллактические смещения составляют десятые и сотые доли секунды дуги, и их можно обнаружить лишь в крупные телескопы и на фотографиях при чрезвычайно точных измерениях видимых положений звезд. Впервые параллактическое смещение, равное 0″,25, было обнаружено у звезды Веги (α Лиры) в 1835—1837 гг выдающимся русским астрономом В. Я. Струве (1793—1864). Даже у самой близкой к Земле звезды Толиман (α Центавра), находящейся в южном полушарии неба, полугодовое параллактическое смещение, найденное в 1838 г. Т. Гендерсоном (1798—1844), составляет всего лишь 1″,5, что соответствует толщине спички, рассматриваемой невооруженным глазом с расстояния 206 м.

Итак, видимое годовое движение Солнца есть лишь отражение обращения Земли вокруг него, а эклиптика представляет собой большой круг, по которому плоскость земной орбиты пересекается с небесной сферой.

Почему же эклиптика наклонена к небесному экватору на угол $\varepsilon = 23°27'$, а не на какой-нибудь другой? Вспомним, что небесный экватор образован на небесной сфере плоскостью земного экватора и поэтому наклонение эклиптики к небесному экватору равно углу между плоскостью земной орбиты и плоскостью земного экватора (рис. 26). Следовательно, на такой же угол $\varepsilon = 23°27'$ отклонена земная ось от перпендикуляра к плоскости земной орбиты. Так, из астрономических наблюдений установили угол наклона земной оси к плоскости земной орбиты.

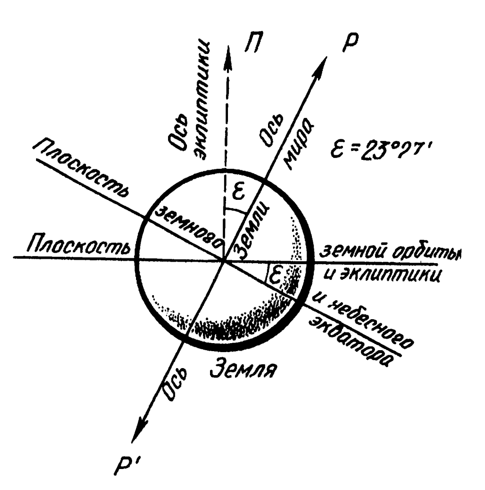


Рис. 26. Объяснение наклонения эклиптики.

Но вернемся к описанию видимого годового движения Солнца. Эклиптика проходит по двенадцати созвездиям (по числу месяцев в году), из которых одиннадцать имеют названия живых существ (реальных или мифических), и поэтому все двенадцать созвездий именуются зодиакальными (от греческого «зодиакос» — зверь или «зоон» — животное). Их названия: Рыбы, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей (рис. 27). Следует отметить, что между созвездиями Скорпиона и Стрельца Солнце перемещается по значительному участку созвездия Змееносца, но так как в году только 12 месяцев, то это созвездие исключено из числа зодиакальных. Точка весеннего равноденствия (♈) находится в созвездии Рыб, точка летнего солнцестояния (♋) — в созвездии Близнецов, точка осеннего равноденствия (♎) — в созвездии Девы и точка зимнего солнцестояния (♑) — в созвездии Стрельца. Астрономические сезоны года начинаются в моменты прохождения Солнцем этих точек.

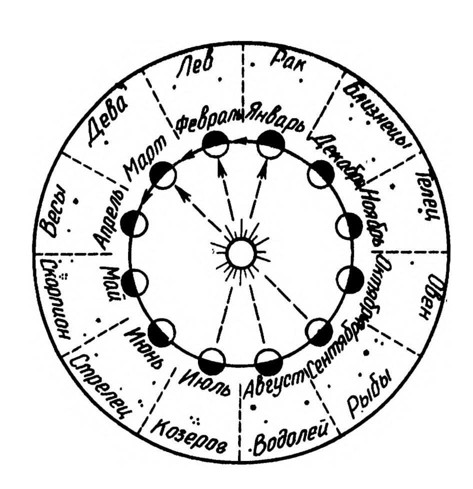


Рис. 27 Видимое годовое движение Солнца по зодиакальным созвездиям. Пунктирные стрелки показывают видимое положение Солнца с Земли.

Весь пояс зодиакальных созвездий часто называется Зодиаком. Протяженность зодиакальных созвездий вдоль эклиптики весьма различна: наибольшая протяженность (около 40°) у созвездий Тельца, Девы и Стрельца, а по созвез-

дию Скорпиона проходит дуга эклиптики, равная всего лишь 5°. Поэтому для удобства счета положения Солнца эклиптика разделена на 12 равных частей (дуг), по 30° каждая, называемых знаками Зодиака. Счет знаков Зодиака начинается от точки весеннего равноденствия, и они также именуются названиями зодиакальных созвездий, но ни в коем случае нельзя смешивать знаков Зодиака с самими зодиакальными созвездиями.

Весной Солнце последовательно проходит по созвездиям Рыб, Овна и Тельца и поэтому они по ночам не видны, так как находятся вместе с Солнцем под горизонтом. Зато противоположные созвездия — Девы, Весов и Скорпиона — видны всю ночь. В летние месяцы Солнце перемещается по созвездиям Близнецов, Рака и Льва, и уже этих созвездий ночью не видно, а хорошо видны созвездия Стрельца, Козерога и Водолея. Наступает осень, и Солнце последовательно смещается в созвездия Девы, Весов и Скорпиона. Теперь уже ночью видны созвездия Рыб, Овна и Тельца, а зимой, когда Солнце проходит по созвездиям Стрельца, Козерога и Водолея, всю ночь сияют на небе созвездия Близнецов и Льва, между которыми видны слабые звезды созвездия Рака.

Уже указывалось, что Солнце смещается к востоку по эклиптике примерно на $\omega = 1°$ за сутки. Теперь следует внести уточнения. Пусть в какой-то момент времени Солнце находилось около некоторой звезды зодиакального созвездия. Совершив один оборот по эклиптике, Солнце вернется к этой же звезде через период $G_* = 365$ сут 6 ч 09 мин 10 с. Этот промежуток времени равен периоду обращения Земли вокруг Солнца и назван звездным годом (от греческого «годос» — путь).

Следовательно, среднее ежесуточное смещение Солнца по эклиптике $\omega = 360° \cdot (365^д6^ч09^м10^с)$[1] $= 360° \cdot 365^д,256 = 0°,986 = 0°59'$. Но это лишь среднее суточное смещение. В действительности дугу эклиптики в 180° от точки весеннего до точки осеннего равноденствия Солнце проходит с 21 марта до 23 сентября за 186 сут, т. е. в весенне-летний период ежесуточное смещение Солнца $\omega = 180° : 186$ сут $= 0°,968 = 0°58'$. Другую половину эклиптики в 180° Солнце проходит за 179 сут, т. е. в осенне-зимний период оно смещается за сутки на $1°00'$ Неравномерное движение Солнца по эклиптике является следствием обращения Земли вокруг Солнца не по окружности, а по эллиптической орбите, из-за чего расстояние от Солнца и скорость движения Земли периодически изменяются в небольших пределах: чем Земля ближе к Солнцу, тем быстрее она движется. Ближе всего к Солнцу Земля бывает в начале января, а дальше всего — в начале июля, что подтверждается точными измерениями диаметра солнечного диска: наибольший диаметр ($32'35''$) бывает в начале января, а наименьший ($31'31''$) — в начале июля.

В силу воздействия на Землю Луны и Солнца (см. главу V) плоскость земного и небесного экватора медленно поворачивается, и поэтому точки равноденствий и солнцестояний также медленно смещаются по эклиптике с востока к западу, навстречу видимому годовому движению Солнца. Это смещение, обнаруженное еще во II в. до н. э. древнегреческим астрономом Гиппархом и называемое прецессией (от латинского *praecessio* — предшествование), сравнительно невелико, всего лишь $50'',3$ в год. Но из-за него Солнце приходит в точку весеннего

[1] Здесь и далее буквой «д» обозначены сутки, а часы, минуты и секунды переведены в доли суток.

равноденствия каждый раз раньше, чем в предыдущем году (т. е. раньше, чем Земля завершит оборот вокруг Солнца), на интервал времени τ. Значение τ нетрудно подсчитать, помня, что среднее суточное смещение Солнца $\omega = 0°,986$; тогда

$$\tau = \frac{50'',3}{0°,986} \text{ сут.}$$

Учитывая, что $1° = 3600''$ и 1 сут $= 24 \cdot 60^{м} = 1440^{м}$, найдем:

$$\tau = \frac{50'',3 \cdot 1440^{м}}{0,986 \cdot 3600''} = 20^{м},4 = 20^{м}24^{с}$$

Следовательно, промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Солнцем точки весеннего равноденствия, названный тропическим годом, короче звездного года на $\tau = 20^{м}24^{с}$ и его продолжительность $G_{\Upsilon} = 365^{д}5^{ч}48^{м}46^{с}$.

Наступление сезонов года связано с тропическим годом, и благодаря прецессии они ежегодно начинаются на $20^{м}24^{с}$ раньше, чем Земля закончит очередной оборот вокруг Солнца.

СМЕНА СЕЗОНОВ ГОДА И ТЕПЛОВЫЕ ПОЯСА

Смена сезонов года на Земле является следствием трех причин: обращения Земли вокруг Солнца, наклона земной оси к плоскости земной орбиты и сохранения направления оси в пространстве[1], что приводит к периодическому изменению условий освещения и обогревания земных полушарий, вызывающему смену сезонов года. Отвесные солнечные лучи дают света и тепла больше, чем наклонные лучи. В физике и астрономии углом падения лучей на какую-либо поверхность считается угол между их направлением и перпендикуляром к поверхности. Поэтому угол падения солнечных лучей всегда равен зенитному расстоянию z Солнца. Когда Солнце проходит зенит, его $z = 0°$ и местность получает от Солнца количество теплоты I_0. При ином зенитном расстоянии z

$$I = I_0 \cos z, \tag{1.13}$$

а отношение количества теплоты, получаемого местностью при различных зенитных расстояниях Солнца z_1 и z_2, равно:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos z_1}{\cos z_2}. \tag{1.14}$$

Формулы (1.13) и (1.14) позволяют также сравнивать освещенность местности солнечными лучами при различной высоте Солнца над горизонтом.

На рисунке 28 изображены положения Земли на орбите в разные дни года. Освещенное Солнцем дневное полушарие Земли отделяется от неосвещенного, ночного полушария линией светораздела — терминатором (от латинского *terminare* — ограничивать), имеющим форму окружности. Когда терминатор

[1] Незначительное уклонение земной оси на 50″,3 за год на смену сезонов года не влияет

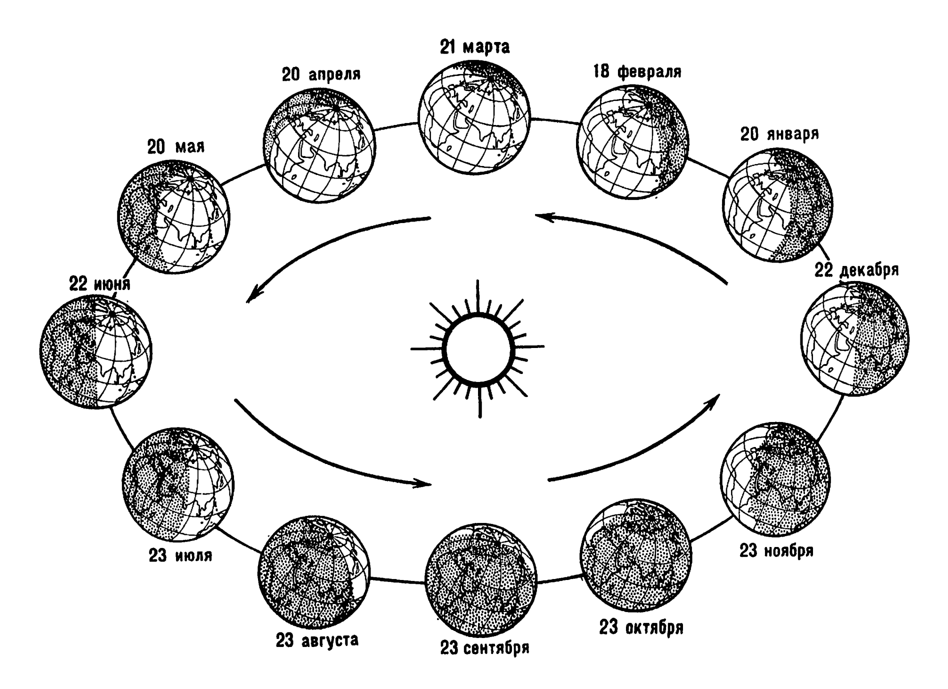


Рис. 28. Смена сезонов года на Земле.

пересекает географические полюсы Земли, плоскость земного и небесного экватора проходит через Солнце, и именно поэтому с Земли оно видно на небесном экваторе (рис. 29) — наступают равноденствия, в которые продолжительность дня и ночи должна быть одинаковой (отсюда возник термин «равноденствие»). В действительности в эти даты продолжительность дня (от восхода до захода Солнца) на несколько минут больше продолжительности ночи, так как, во-первых, верхний край Солнца восходит раньше его центра (для которого склонение $\delta = 0°$) и заходит позже него, а во-вторых, из-за преломления солнечных лучей в земной атмосфере верхний край появляется (при восходе) и исчезает (при заходе), когда центр солнечного диска находится на глубине около 50′ под горизонтом. Поэтому в дни равноденствий Солнце на географических полюсах уже полностью видно над горизонтом.

В период между днем весеннего и днем осеннего равноденствия северный полюс Земли обращен к Солнцу, а плоскость экватора проходит южнее Солнца, которое поэтому пребывает над ним, т. е. в северной полусфере неба. Склонение Солнца положительно, его дневной путь над горизонтом местностей северного полушария Земли продолжителен (более 12 ч) и высок, отчего обогрев этого полушария значителен, и в нем длятся теплые сезоны года. В зоне вокруг северного полюса Земли Солнце не заходит (полярный день), в зоне вокруг южного полюса — не восходит (полярная ночь), а в остальных районах южного полушария дневной путь Солнца низок и непродолжителен (меньше 12 ч) — там длятся холодные сезоны года. В день летнего солнцестояния терминатор удаляется от географических полюсов Земли на 23°27′ и таким же становится склонение Солнца, после чего начинает медленно уменьшаться.

В период между днями осеннего и весеннего равноденствия южный полюс повернут к Солнцу, плоскость экватора проходит севернее его и поэтому оно находится в южной полусфере неба (склонение Солнца отрицательно). Теперь уже теплые сезоны года длятся в южном полушарии Земли. В день зимнего солнцестояния терминатор снова удаляется от полюсов Земли на 23°27′ и поэтому склонение Солнца становится равным —23°27′, после чего постепенно увеличивается. Отсюда возник термин «солнцестояние» — рост или уменьшение склонения Солнца останавливается.

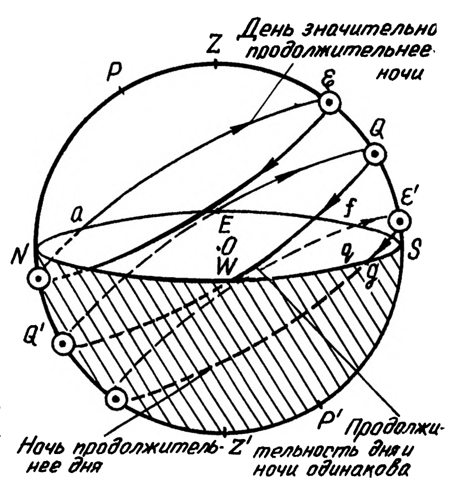


Рис. 29. Суточный путь и полуденная высота Солнца в северном полушарии Земли в дни равноденствий и солнцестояний.

На земном экваторе продолжительность дня и ночи всегда неизменна, но из-за преломления световых лучей в атмосфере, называемого астрономической рефракцией (от латинского *refractus* — преломленный), день на 7 мин продолжительнее ночи.

Границы тепловых поясов на Земле проведены по астрономическим признакам. В жарком поясе, простирающемся по обе стороны вдоль экватора, Солнце в истинный полдень обязательно проходит в зените тех местностей, географическая широта которых равна его склонению в данный день (вспомним условие прохождения светила в зените: $\delta = \varphi$). А так как склонение Солнца не превышает 23°27′, то и границы жаркого пояса, называемые тропиками, расположены на географических параллелях с такой же широтой. В зените северного тропика Солнце проходит только в день летнего солнцестояния, а в зените южного тропика — в день зимнего солнцестояния. На земном же экваторе Солнце проходит в зените в дни равноденствий ($\varphi = \delta = 0°$).

Холодные пояса ограничены полярными кругами, положение которых определяется условием незаходящих светил (см. с. 27):

$$\varphi = 90° - \delta = 90° - 23°27' = 66°33'$$

На северном полярном круге Солнце не должно заходить в день летнего солнцестояния, а на южном полярном круге — в день зимнего солнцестояния. В действительности на полярных кругах Солнце не заходит на протяжении месяца (15 суток до и после солнцестояния), так как радиус солнечного диска значителен (0°,25) и, кроме того, из-за рефракции Солнце вблизи горизонта видно примерно на 0°,6 выше своего истинного положения. Вследствие этого на полярных кругах Солнце становится незаходящим при склонении 22°,6, в дни солнцестояний не заходит на географической широте $\varphi \geqslant 65°,7$, а полярная ночь распространяется от полюсов лишь до географических параллелей с $\varphi = 67°,4$, и на самих полярных кругах ее не бывает

В умеренных тепловых поясах полярных дней и ночей не бывает и Солнце никогда не проходит в зените.

Используя формулы (1.6), (1.8) и (1.14), полезно вычислить отношение количества теплоты, получаемого в полдень в дни равноденствий и солнцестояний местностью, в которой проживает читатель, а также зонами экватора, тропиков и полярных кругов. Это поможет лучше уяснить различие в тепловых поясах Земли.

В любом тепловом поясе после захода Солнца темнеет не сразу, а постепенно, так как земная атмосфера рассеивает свет Солнца, находящегося под горизонтом. По этой же причине рассвет начинается до восхода Солнца. Постепенное ослабление дневного света после захода Солнца до появления на небе ярких звезд называется вечерними сумерками, а усиление света утром — от момента исчезновения ярких звезд до восхода Солнца — утренними сумерками. Вечерние сумерки оканчиваются, и на небе появляются яркие звезды при погружении Солнца под горизонт на глубину около 7° (высота Солнца $h = -7°$). Поэтому продолжительность сумерек зависит от географической широты местности и от сезонов года. На земном экваторе, где Солнце всегда поднимается и опускается перпендикулярно к горизонту, сумерки непродолжительны, всего лишь около 25 мин. В удаленных от экватора местностях, где суточный путь Солнца значительно наклонен к горизонту, сумерки длятся дольше, а на географических полюсах — до трех недель.

Если Солнце даже в нижней кульминации опускается под горизонт менее чем на 7°, то звезд совсем не видно и вместо ночи вплоть до утра длятся сумерки, называемые белыми ночами. По формуле (1.10) легко вычислить географическую широту мест, в которых наступают белые ночи. Приняв склонение Солнца $\delta = 23°,5$ и его высоту в нижней кульминации $h_н = -7°$, найдем границу белых ночей:

$$\varphi = 90° - \delta + h_н = 90° - 23°,5 - 7° = 59°,5,$$

т. е. белые ночи бывают в местностях, расположенных между полюсами Земли и географическими параллелями с широтой $\varphi = \pm 59°,5$. Поэтому и знаменитые ленинградские июньские белые ночи, воспеваемые поэтами, не являются исключением, а объясняются значительной северной широтой Ленинграда ($\varphi \approx +60°$).

Чтобы окончательно стемнело и на небе появились слабые звезды, Солнцу необходимо погрузиться под горизонт примерно на 18° Поэтому в северном полушарии Земли в летнее время темные ночи бывают только в южных районах, а вблизи дня летнего солнцестояния — лишь в местах с географической широтой $\varphi \leqslant 48°,5$.

ГЛАВА II

СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЗВЕЗДНОЕ ВРЕМЯ

Самая простая система счета времени называется звездным временем. Она основана на вращении Земли вокруг оси. Его можно считать равномерным, так как обнаруженные отклонения не превышают 0,°001 за сутки.

Представим себе, что мы в какой-то вечер пронаблюдали верхнюю кульминацию некоторой звезды, например Веги (α Лиры), и в следующий вечер повторили наблюдение. Очевидно, что промежуток времени между этими одноименными явлениями равен периоду вращения Земли вокруг оси и соответствует ее повороту на 360°. Период вращения Земли вокруг оси называется звездными сутками. Звездные сутки делятся на 24 звездных часа ($24^ч$), каждый звездный час — на 60 звездных минут ($60^м$) и каждая звездная минута — на 60 звездных секунд ($60^с$).

За время поворота Земли на 360° часовой угол любой звезды изменяется тоже на 360°, или на $24^ч$. Поэтому представляется возможность измерять звездное время часовым углом какой-либо звезды (см. с. 22, рис. 14). Удобнее всего оказалось измерять звездное время часовым углом точки весеннего равноденствия, так как, во-первых, экваториальные координаты (прямое восхождение и склонение) звезд на протяжении года все же медленно изменяются, а у точки весеннего равноденствия обе эти координаты всегда равны нулю; во-вторых, эта точка связана с Землей, поскольку она лежит на линии пересечения плоскости земного (небесного) экватора с плоскостью земной орбиты (плоскостью эклиптики) и ее положение на небе легко определяется по прямому восхождению Солнца (см. с. 31).

Итак, звездное время S измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия, выраженным в единицах времени, т. е.

$$S = t_{\gamma}.$$

Это означает, что началом звездных суток ($S = 0^ч$) считается момент верхней кульминации точки весеннего равноденствия ($t_{\Upsilon} = 0^ч$), а серединой — момент ее нижней кульминации ($S = t_{\Upsilon} = 12^ч$).

Из рисунка 14 видно, что часовой угол $t = Qm$ и прямое восхождение $\alpha = \Upsilon m$ любого светила связаны с часовым углом точки весеннего равноденствия $t_{\Upsilon} = Q\Upsilon = S$ равенством

$$t = S - \alpha.$$

Следовательно, в момент верхней кульминации светила, когда его часовой угол $t = 0^ч$, звездное время

$$S = \alpha, \qquad (2.1)$$

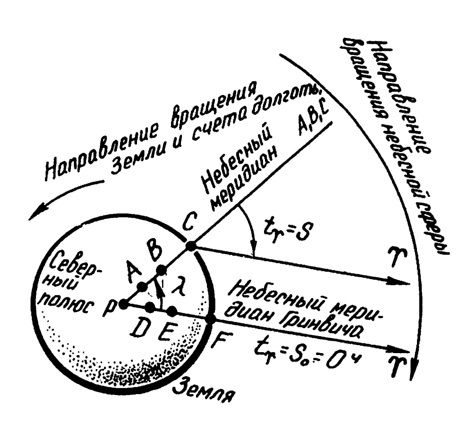


Рис. 30. Связь звездного времени с географической долготой.

т. е. звездное время в любой момент всегда равно прямому восхождению светила, находящегося в верхней кульминации.

В один и тот же момент звездное время одинаково на одном земном меридиане и различается на разных меридианах, так как из всех точек земной поверхности направления на точку весеннего равноденствия ♈ параллельны между собой. Поэтому, если в пунктах *D*, *E* и *F* (рис. 30), лежащих на гринвичском меридиане (его географическая долгота $\lambda_0 = 0^ч = 0°$), точка весеннего равноденствия находится в верхней кульминации и, следовательно, там звездное время

$$S_0 = 0^ч, \tag{2.2}$$

то на меридиане пунктов *A*, *B* и *C* звездное время

$$S = t_\gamma = \lambda, \tag{2.3}$$

где λ — географическая долгота этого меридиана, отсчитываемая от гринвичского в направлении вращения Земли, т. е. к востоку.

Сравнивая равенства (2.2) и (2.3), найдем, что

$$S = S_0 + \lambda, \tag{2.4}$$

т. е. звездное время в любом месте земной поверхности отличается от гринвичского звездного времени на географическую долготу этого места.

Написав равенство (2.4) для двух пунктов с географической долготой λ_2 и λ_1 и вычтя одно из другого, получим:

$$S_2 - S_1 = \lambda_2 - \lambda_1, \tag{2.5}$$

т е. звездное время двух пунктов отличается на разность их географической долготы.

Из формул (2.4) и (2.5) следует, что звездное время на более восточных географических меридианах всегда больше, чем на западных, и если численно оно окажется меньше, то там начались новые звездные сутки. Поэтому и счет географической долготы проще вести от Гринвича, только в одну сторону, к востоку, в направлении увеличения звездного времени, а измерять географическую долготу выгодно в единицах времени (см. с. 19), чтобы проводить вычисления без переводов угловых единиц во временные и обратно

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЯМОГО ВОСХОЖДЕНИЯ СВЕТИЛ И ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ДОЛГОТЫ МЕСТ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Прежде всего регулируют ход часов по длительности звездных суток. Для этого несколько ночей подряд отмечают показание часов в моменты верхней кульминации одной и той же звезды: при идеальной регулировке эти показания должны быть одинаковыми. Затем отмечают показание $S_ч$ тех же часов в момент верхней кульминации Солнца и, измерив его зенитное расстояние, вычисляют прямое восхождение Солнца $\alpha_\odot$ (см. с. 31). Так как, согласно формуле (2.1), в отмеченный момент звездное время

$$S = \alpha_\odot,$$

то находят разность

$$u_s = S - S_ч = \alpha_\odot - S_ч,$$

которая называется поправкой часов и позволяет знать точное звездное время при неправильных показаниях часов. Так, если спустя некоторое время показание часов стало $S_{ч1}$, то в этот момент точное звездное время $S = S_{ч1} + u_s$. Часы, показывающие звездное время, называются звездными часами.

Прямое восхождение ярких звезд, видимых в телескопы даже днем, определяют по звездным часам и по прямому восхождению Солнца. Сначала отмечают показание часов $S_ч$ в момент верхней кульминации Солнца, а затем показание $S'_ч$ в момент верхней кульминации звезды. Тогда, учитывая формулу (2.1), искомое прямое восхождение звезды

$$\alpha = \alpha_\odot + (S'_ч - S_ч).$$

Зная прямое восхождение нескольких ярких звезд, определяют аналогичным образом (но уже ночью) прямое восхождение остальных светил.

В дальнейшем проверка звездных часов проводится по звездам с известным прямым восхождением с использованием той же формулы (2.1) аналогично тому, как это делалось по Солнцу.

Измеренные в астрономических обсерваториях прямые восхождения звезд публикуют в звездных каталогах. Используя формулу (2.4), по этим данным определяют географическую долготу мест земной поверхности. При этом местное звездное время S находят из наблюдений верхней кульминации звезд, а гринвичское звездное время S_0 определяют по звездному хронометру[1], заранее установленному по радиосигналам, передаваемым из Гринвича.

СРЕДНЕЕ, ПОЯСНОЕ И ДЕКРЕТНОЕ ВРЕМЯ

В общественно-производственной жизни пользоваться звездным временем нельзя, так как смена дня и ночи зависит от положения Солнца относительно горизонта. Поэтому в производственной жизни счет времени должен определяться часовым углом Солнца.

---

[1] Переносные точные астрономические часы называют хронометром (от греческих слов «хронос» — время и «метрон» — мера).

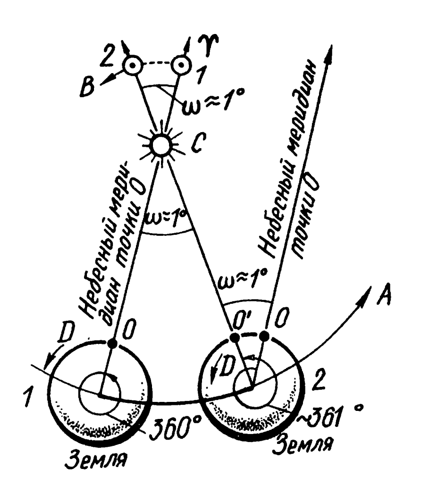


Рис. 31. Звездные и истинные солнечные сутки.

Момент верхней кульминации Солнца называется истинным полднем (середина дня). В этот момент часовой угол Солнца $t_\odot = 0^ч$, а время принимается равным $T_\odot = 12^ч$. Следовательно, время, измеряемое по положению Солнца и называемое истинным солнечным временем,

$$T_\odot = t_\odot + 12^ч,$$

т. е. измеряется часовым углом Солнца, увеличенным на $12^ч$

Промежуток времени между одноименными (либо верхними, либо нижними) кульминациями Солнца называется истинными солнечными сутками. За начало истинных солнечных суток принята истинная полночь (момент нижней кульминации Солнца), в которую $t_\odot = 12^ч$, а истинное солнечное время $T_\odot = 12^ч + 12^ч = 24^ч$, или $T_\odot = 0^ч$, т. е. оканчиваются текущие солнечные сутки и начинаются новые.

Из-за движения Земли вокруг Солнца истинные солнечные сутки продолжительнее звездных суток примерно на 4 мин. Чтобы это усвоить, представим себе, что, когда Земля находилась в положении *1* относительно Солнца *С* (рис. 31), в пункте *О* земной поверхности наступил истинный полдень и в этот момент Солнце пришло в точку весеннего равноденствия ♈. Следовательно, Солнце и точка весеннего равноденствия одновременно проходят небесный меридиан пункта *О*. Их часовые углы $t_\odot = t_♈ = 0^ч$, и поэтому звездное время $S = t_♈ = 0^ч$, а истинное солнечное время

$$T_\odot = t_\odot + 12^ч = 12^ч.$$

По прошествии звездных суток Земля повернется вокруг своей оси (в направлении стрелки *D*) на 360° и сдвинется по орбите (в направлении стрелки *А*) на угол $\omega \approx 1°$, придя в положение *2*. Тогда точка весеннего равноденствия ♈ снова окажется в верхней кульминации и ее часовой угол $t_♈ = 0^ч$. Но истинный полдень еще не наступит, так как Солнце не дойдет до небесного меридиана, поскольку из-за движения Земли оно сместилось по эклиптике к востоку примерно на 1°. Истинный полдень в пункте *О* наступит после поворота Земли на угол $\omega \approx 1°$, когда этот пункт повернется к Солнцу (положение *О'*). Следовательно, продолжительность истинных солнечных суток соответствует повороту Земли вокруг оси не на 360°, а примерно на 361°. Поэтому истинные солнечные сутки продолжительнее звездных суток приблизительно на 4 мин (вспомним, что $1° = 4^м$).

Из-за неравномерного движения Солнца по эклиптике продолжительность истинных солнечных суток на протяжении года не остается одинаковой, что не позволяет их использовать в практической жизни. Поэтому на основе истинного солнечного времени построена система среднего солнечного времени, или, короче, среднего времени.

Средняя продолжительность истинных солнечных суток на протяжении года принимается за средние (солнечные) сутки. Поскольку среднее суточное смещение Солнца

$$\omega = \frac{360°}{365\ (\text{дней в году})} = 0°{,}986 = 3^{м}56^{с},$$

то продолжительность средних суток постоянна и превышает продолжительность звездных суток на $3^{м}56^{с}$.

Середина средних суток называется средним полднем, а их начало — средней полночью. Средний полдень и средняя полночь совпадают с истинными четыре раза в год: 15 апреля, 13 июня, 1 сентября и 25 декабря. В остальные дни года средний полдень и средняя полночь наступают то несколько раньше, то несколько позже истинных, но это различие не превышает $16^{м}{,}5$.

Разность между средним временем (T_λ) и истинным солнечным временем ($T_\odot$) называется уравнением времени

$$\eta = T_\lambda - T_\odot ,$$

значения которого для разных дней года публикуются в астрономических ежегодниках.

Средние сутки содержат 24 средних часа, каждый час — 60 средних минут (м), каждая минута — 60 средних секунд (с), так что в сутках содержится $1440^{м}$, или $86\,400^{с}$. Эти единицы времени имеют строго постоянную продолжительность и используются для счета времени в науке, технике и общественно-производственной жизни. А так как иные системы счета времени в общественно-производственной жизни не применяются, то прилагательные «средний» и «средняя» оказываются излишними и их просто опускают перед наименованием средних единиц счета времени.

Теперь можно сказать, что в общепринятых (средних) единицах времени период суточного вращения Земли составляет не одни сутки ($24^{ч}$), как об этом пишут в популярных книгах, а $24^{ч} - 3^{м}56^{с} = 23^{ч}56^{м}04^{с}$. Следовательно, за один календарный год продолжительностью в 365 средних суток протекает 366 звездных суток, т. е. Земля поворачивается вокруг своей оси 366 раз.

Солнце одновременно освещает половину земного шара и суточным вращением небесной сферы перемещается с востока (восход) к западу (заход). Следовательно, утро нового календарного дня наступает сначала в восточных районах, а затем постепенно передвигается к западу. Если на рисунке 30 (см. с. 40) направление на точку весеннего равноденствия ♈ заменить направлением на Солнце, то будет ясно, что в каждой местности с географической долготой λ среднее время

$$T_\lambda = T_0 + \lambda \tag{2.6}$$

где T_0— среднее гринвичское время, а различие в среднем времени двух пунктов равно разности их географической долготы:

$$T_{\lambda_2} - T_{\lambda_1} = \lambda_2 - \lambda_1 . \tag{2.7}$$

Среднее гринвичское время называется всемирным, реже — мировым и еще реже — универсальным временем.

Формулы (2.6) и (2.7) широко используются в практике определения географической долготы.

Следует оговорить, что среднее время когда-то было названо местным, такое название часто и теперь встречается в астрономической литературе. Однако в настоящее время этот термин в применении к среднему времени неприемлем, так как в общественно-производственной жизни под местным временем понимается время, по которому живет определенная местность. Большинство стран мира не пользуется системой среднего времени, поскольку она оказалась неудобной именно потому, что связана с географической долготой. Для удаленных друг от друга населенных пунктов такая система счета времени неплоха, но для близко расположенных населенных пунктов она крайне неудобна. Так, Москва и Ленинград тесно связаны в своем развитии, и многим жителям обоих городов часто приходится обмениваться служебными визитами. Скорый поезд преодолевает расстояние между Москвой и Ленинградом за 7 ч, а самолет — за 50 мин. Различие же в среднем времени этих городов составляет 29 мин. Прибывший из Ленинграда в Москву должен перевести свои часы на $29^м$ вперед, возвратившись в Ленинград, снова перевести на $29^м$ назад.

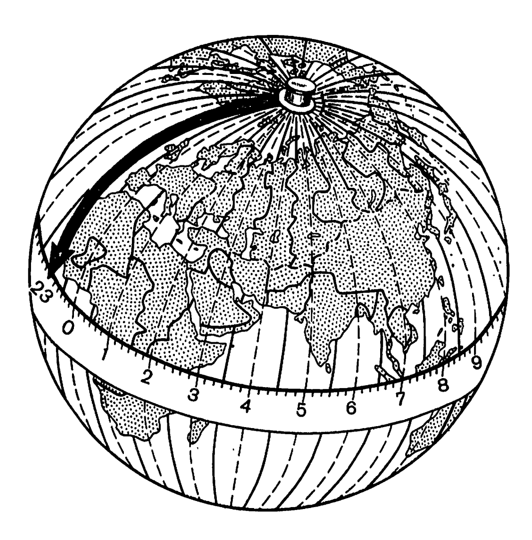


Рис. 32. Часовые пояса и их центральные меридианы (пунктир).

Среднее время различается в пределах одной территориальной области и даже района. Например, в Московской области различие в среднем времени между ее восточными и западными окраинами составляет $18^м$. Удобно ли, прибыв, скажем, утром из Можайска в Москву, передвигать стрелки на $6^м$ вперед, а вечером, возвратившись в Можайск, снова отводить их на $6^м$ назад? Значит, необходимо как-то так изменить систему счета времени, чтобы ее преимущества для отдаленных городов сохранились, а неудобства были ликвидированы. И нет ничего удивительного в том, что реформа счета времени была предложена еще в 1879 г не астрономами, а начальником железнодорожного движения Канады Флемингом.

Новая система счета времени, получившая название поясной системы или поясного времени, была введена в западных странах Европы в 1888 г., а в России — лишь при Советской власти, с 1 июля 1919 г.

Сущность поясной системы счета времени состоит в том, что поверхность земного шара от полюса до полюса разграничена линиями на 24 часовых пояса, каждый шириной примерно в 15°, или $1^ч$ (рис. 32). Центральные географические меридианы часовых поясов, показанные на рисунке 32 пунктиром, отстоят друг

от друга по долготе точно на 15° ($1^ч$). Границы же часовых поясов проведены по государственным и административным границам, а также по естественным рубежам (горным хребтам, большим рекам), и только в незаселенных местностях — по географическим меридианам. За начальный (нулевой) меридиан принят гринвичский ($\lambda_0 = 0° = 0^ч$). Нумерация часовых поясов идет с запада к востоку, в пределах от 0 до 23: гринвичский, или западноевропейский, часовой пояс считается нулевым ($n = 0$), соседний с ним к востоку среднеевропейский часовой пояс считается первым ($n = 1$), далее к востоку лежит второй, или восточноевропейский, часовой пояс ($n = 2$) и т. д. Последний, 23-й часовой пояс лежит к западу от нулевого пояса и его центральный меридиан отстоит от гринвичского на 15° ($1^ч$) к западу[1]. Единицы же счета времени остаются прежними: средние сутки, час, минута, секунда.

Так как центральные меридианы часовых поясов отстоят друг от друга по долготе ровно на 15° ($1^ч$), то их поясное время T_n совпадает со средним временем T_λ, т. е.

$$T_n = T_\lambda = T_0 + \lambda = T_0 + n,$$

где n — номер часового пояса, равный целому числу часов.

Все же остальные населенные пункты живут по времени центрального меридиана своего часового пояса, и поэтому их поясное время T_n связано с гринвичским (всемирным) временем T_0 формулой

$$T_n = T_0 + n. \qquad (2.8)$$

Разность во времени между двумя населенными пунктами, лежащими в разных часовых поясах n_2 и n_1, равна разности номеров часовых поясов:

$$T_{n_2} - T_{n_1} = n_2 - n_1,$$

причем эта разность всегда равна целому числу часов.

Связь среднего T_λ и поясного T_n времени любого пункта, имеющего географическую долготу λ и находящегося в часовом поясе n, можно найти, используя формулы (2.6) и (2.8):

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda.$$

В принципе различие между поясным и средним временем не должно было бы превышать $30^м$, но из-за извилистости границ часовых поясов она может достичь целого часа.

В поясной системе счета времени имеется поясной полдень ($T_n = 12^ч$) и поясная полночь ($T_n = 0^ч$), в которую начинается новая календарная дата. В пределах одного часового пояса поясной полдень (или поясная полночь) наступает одновременно. На центральном меридиане часового пояса поясной полдень совпадает со средним ($T_n = T_\lambda = 12^ч$), а поясная полночь — со средней полночью ($T_n = T_\lambda = 0^ч$). На остальной территории часового пояса такого совпаде-

---

[1] За последние годы в некоторых западных странах стали вести счет часовых поясов к западу, а в иных — и к западу, и к востоку, что уже совсем бессистемно, так как создает путаницу в расчетах.

ния нет: в восточных районах поясные моменты наступают позже средних, а в западных, наоборот, раньше средних.

Но и это еще не все. В целях лучшего использования светлого времени суток ради экономии электроэнергии, расходуемой на освещение, часы на территории Советского Союза с 16 июля 1930 г. переведены на 1 ч вперед. Этот счет времени введен постановлением (декретом) правительства и в астрономии называется декретным временем. Очевидно, в любом месте декретное время

$$T_д = T_n + 1^ч = T_0 + n + 1^ч = T_\lambda - \lambda + n + 1^ч,$$

а различие в декретном времени $T_{д_2}$ и $T_{д_1}$ двух часовых поясов n_2 и n_1 по-прежнему равно разности их номеров:

$$T_{д_2} - T_{д_1} = n_2 - n_1.$$

По территории Советского Союза проходит 11 часовых поясов, с $n = 2$ по $n = 12$ включительно, и каждый часовой пояс живет по декретному времени, т е. по поясному времени своего восточного соседа. Так, Ленинград, Калининград, Москва, Кишинев, Киев находятся во 2-м часовом поясе, а живут по поясному времени 3-го часового пояса; Азербайджанская, Армянская и Грузинская республики расположены в 3-м часовом поясе, а живут по поясному времени 4-го часового пояса и т д. Декретное время 2-го часового пояса (или поясное время 3-го часового пояса) называется московским временем ($T_м$).

Однако имеются и исключения. В силу сложившихся обстоятельств в Татарской АССР, Краснодарском крае, Ставропольском крае, Горьковской, Костромской, Рязанской и некоторых других областях (все расположены в 3-м часовом поясе) действует поясное время, так что время на этих территориях совпадает с московским временем.

В системе декретного времени существуют декретный полдень ($T_д = 12^ч$) и декретная полночь ($T_д = 0^ч$), с которой начинается новая календарная дата. Декретный полдень и декретная полночь наступают на один час раньше поясных и всегда раньше средних, причем разность $T_д - T_\lambda$ в западных районах часовых поясов может достичь (в зависимости от ширины пояса) двух часов. Становится понятным, почему, например, в Риге и Калининграде (расположенных вместе с Москвой во 2-м часовом поясе) зимой в 9 ч утра еще темно, в то время как в Москве уже светло. Рассвет зависит от восхода Солнца, с которым связано среднее время. В 9 ч по московскому времени в Москве среднее время $T_\lambda = 8^ч 30^м$ и Солнце уже взошло, а в Риге и Калининграде, расположенных западнее Москвы, $T_\lambda \approx 7^ч 30^м$ и Солнце еще находится под горизонтом.

Жителям и учреждениям совершенно безразлично, какое время принято на их территории — поясное или декретное, и они называют его местным. О всех событиях официальные документы, печать, радио и телевидение сообщают со ссылкой на местное время, хотя в действительности это время декретное или поясное, в зависимости от принятой системы счета времени. Таким образом, сама жизнь вносит коррективы в астрономическую терминологию, и с этим необходимо считаться, т е. местным временем называть время, действующее на данной территории, а астрономическое время T_λ, связанное с географической долготой, именовать средним временем, а не местным.

При решении практических задач на пересчет времени проще всего оперировать не с номерами часовых поясов, а с разностью $\Delta T = T - T_м$ между при-

нятым (местным) временем T и московским временем $T_м$, которая хорошо известна. При необходимости среднее время T_λ в любом пункте с географической долготой λ может быть найдено по формуле

$$T_\lambda = T + \tau,$$

в которой постоянная поправка[1]

$$\tau = \lambda - 3^ч - \Delta T.$$

В заключение отметим, что все виды междугороднего транспорта и связи на огромной территории СССР не имеют возможности в процессе своей напряженной работы подсчитывать моменты времени в разных часовых поясах. Поэтому междугородний транспорт и связь всей страны работают только по московскому времени. Этим и объясняется, почему на крупных транспортных вокзалах и узлах связи, расположенных вне второго часового пояса, установлено, как правило, двое часов: одни показывают местное время, а другие — московское.

В настоящее время физике, астрономии, геодезии и ряду других наук требуются отсчеты времени с точностью до одной миллиардной доли секунды (10^{-9} с), чего практика астрономических наблюдений обеспечить не может. Поэтому созданы молекулярные и атомные эталоны счета времени, основанные на постоянстве колебаний молекул и атомов. Такая система счета времени получила название атомного времени. За атомную секунду принята продолжительность 9 192 631 770 колебаний атома цезия-133, и именно эта секунда используется в Международной системе единиц измерения (СИ). Использование атомного времени привело к обнаружению небольших колебаний продолжительности звездных суток, что является прямым следствием незначительных нарушений равномерного вращения Земли.

Однако продолжительность года, принятая в современном календаре, не содержит целого числа атомных секунд. Поэтому для правильного счета времени[2] через каждые полгода (30 июня и 31 декабря) к длительности средних суток добавляется или из нее вычитается 1 секунда.

ЛИНИЯ СМЕНЫ ДАТЫ И ЕЕ УЧЕТ В СЧЕТЕ СУТОК

В каждом месте Земли новая календарная дата наступает в полночь по местному (принятому) времени. В Москве и Новосибирске новая дата наступает в момент $T_д = 0^ч$ по декретному времени, а в Краснодаре и Горьком — в момент $T_п = 0^ч$ по поясному времени. Из-за вращения Земли с запада к востоку новый календарный день сначала наступает в восточных районах и постепенно переходит в западные. Но Земля — шар, и по отношению к любому месту ее поверхности всегда существуют восточные и западные районы. Так, например, Аляска лежит восточнее Чукотского полуострова, а Сибирь — восточнее Атлантиче-

---

[1] Формула выводится просто: среднее время $T_\lambda = T_0 + \lambda$, московское время $T_м = T - \Delta T$ и всемирное время $T_0 = T_м - 3^ч$, откуда $T_\lambda = T_м - 3^ч + \lambda = T + (\lambda - 3^ч - \Delta T)$, или $T_\lambda = T + \tau$.

[2] Интересующихся действием приборов, применяемых для счета времени, мы отсылаем к книге Ф. С. Завельского «Время и его измерение» (М., 1977).

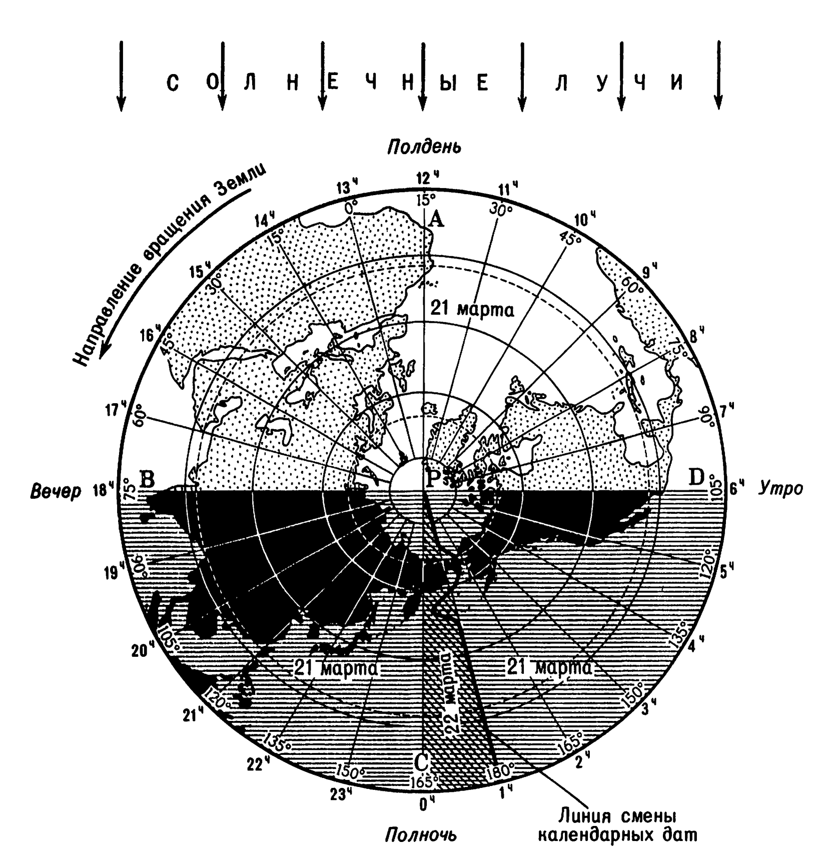


Рис. 33. Солнечное время и линия смены календарных дат (утолщенная линия).

ского побережья США и Канады, которое, в свою очередь, расположено восточнее Аляски. Так в каких же районах новая календарная дата впервые вступает на Землю?

Этот вопрос отнюдь не праздный. Представим себе Землю (со стороны ее северного полюса p), освещаемую солнечными лучами (рис. 33). Пусть на географическом меридиане pA — полдень ($T_A = 12^ч$) какой-то даты, например 21 марта. Тогда на меридиане pB, расположенном к востоку от pA, полдень прошел 6 часов назад и поэтому там время $T_B = 18^ч$ той же даты 21 марта. На меридиане же pC наступила полночь, т. е. $T_C = 24^ч$ старой даты 21 марта или $T_C = 0^ч$ новой даты 22 марта. На меридиане pD, расположенном к западу от pA, полдень еще не наступил и время там $T_D = 6^ч$ даты 21 марта. Далее, к западу, в направлении к меридиану pC, время еще меньше (но дата — та же, 21 марта), и, наконец, мы должны признать, что на самом меридиане pC время $T_C = 0^ч$ 21 марта. Так начало какой же даты считать на меридиане pC: 21 марта или 22 марта?

Чтобы не было этой путаницы, международным соглашением установлена условная линия, называемая линией смены даты. Она проходит по водным

просторам, нигде не касаясь суши, либо точно по 180° земному меридиану, либо в относительной близости к нему: по Чукотскому морю, Берингову проливу, Beринговому морю и далее по Тихому океану (жирная линия, см. рис. 33). Новая календарная дата начинается на этой линии и постепенно распространяется к западу, в сторону суточного движения Солнца. Поэтому к западу от линии смены даты считается одна календарная дата, а к востоку от нее — предшествующая, старая дата. Таким образом, хотя Чукотка и Аляска разделены Беринговым проливом шириной всего лишь 85 км, календарные даты на них разные: полдень на обоих полуостровах наступает почти одновременно, но календарная дата на Чукотском полуострове опережает дату Аляски на одни сутки. Отсюда следует, что каждая календарная дата существует на Земле 48 часов: она вступает на Землю на Чукотском полуострове и сходит с Земли на Аляске.

Стоит путешественнику пересечь линию смены даты к востоку, как он попадает в старую, предыдущую календарную дату, образно говоря, во вчерашний день; если же он пересечет эту линию к западу, то попадает в новый, завтрашний день. Совершенно ясно, что, пересекая линию смены даты, необходимо учитывать это обстоятельство, иначе можно ошибиться в счете дней. В самом деле, при кругосветном путешествии в направлении с запада к востоку, т. е. в сторону вращения Земли, мы совершим дополнительный оборот вокруг земной оси, лишний раз встретим восход Солнца и посчитаем лишние сутки, которых на Земле в действительности не было (вспомните роман Жюля Верна «Вокруг света в 80 дней»). При кругосветном путешествии в обратном направлении мы повернемся вокруг земной оси на один оборот меньше, чем Земля, и недосчитаемся одних суток.

Поэтому в морской навигации принято при пересечении линии смены даты с востока к западу (корабль попадает в новую дату) отмечать в судовом (вахтенном) журнале время пересечения линии, но даты не исправлять. На другой же день в журнале проставляется не очередная по счету дата, а следующая за ней (например, после 18 июля сразу 20 июля, а не 19), т. е. выбрасывается одна дата, и тем самым расхождение в счете дней устраняется. При пересечении линии смены даты с запада к востоку (корабль переходит в старую дату) календарная дата на следующий день повторяется (например, после 15 августа снова считается 15 августа, а затем уже 16), так что двое суток значатся под одной календарной датой. Таких же правил придерживается и гражданская авиация.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО КАЛЕНДАРЯ

Календарем называется система счета длительных промежутков времени. Свое название она получила от латинского слова «календэ» (*calendae*), которым в Древнем Риме обозначался первый день каждого месяца года. В свою очередь, слово *calendae* происходит от латинского *calare* — объявлять; о начале каждого месяца и нового года оповещалось все население, обязанное своевременно платить налоги и исполнять религиозные обряды, обогащавшие служителей культа.

В древности создание календарей входило в обязанности верховных служителей культа — касты жрецов, принадлежавшей к правящим классам. Жрецы следили за правильностью счета времени, устанавливали дни празднеств и

жертвоприношений, вели хронологические записи событий, вносили поправки в календари, если они расходились с явлениями природы.

История календарей многих народов очень интересна[1]. Здесь мы кратко остановимся лишь на истории современного европейского календаря, принятого в большинстве стран мира.

Основой любого календаря всегда служили (и служат до сих пор) длительные промежутки времени, определяемые по двум периодическим и хорошо заметным явлениям природы — смене лунных фаз[2] и смене сезонов года. Календари, основанные на смене лунных фаз, называются лунными, основанные на смене сезонов года — солнечными, а на обоих этих явлениях — лунно-солнечными.

Каждый календарь обязан установить определенный порядок счета дней (солнечных суток), число суток в длительных периодах времени и указать начало счета самих периодов. Первая задача не вызывает затруднений; третья решается тоже весьма просто, так как за начало счета можно принять любое реальное или мифическое событие. Вторая задача тоже решалась бы легко, если бы период смены лунных фаз, называемый лунным месяцем[3], и тропический год (период смены сезонов года) содержали в точности целое число суток. Но природа не дала нам этого, все три периода несоизмеримы между собой тропический год $G_{\Upsilon} = 365^{д},24220 = 365^{д}5^{ч}48^{м}46^{с}$, а лунный (или синодический) месяц $P_{☾} = 29^{д},53059 = 29^{д}12^{ч}44^{м}03^{с}$ (с точностью до $1^{с}$). Календарный месяц и календарный год, служащие для счета времени в производственной жизни (называемые просто месяцем и годом), должны содержать целое число суток, чтобы начало каждого месяца и года совпадало с началом суток. Поэтому создание идеально точного календаря невозможно, и время от времени в него приходится вводить поправки.

Загадочная смена лунных фаз привлекла к себе внимание древних южных скотоводческих народов (пасших скот преимущественно по ночам, в прохладное время суток), породила культ Луны и стала основой лунного календаря, впервые созданного в середине третьего тысячелетия до нашей эры в Древнем Вавилоне. Тогда же была введена и семидневная неделя, по числу перемещающихся по созвездиям светил — Солнцу, Луне и пяти планетам. Эти светила обожествлялись, им приписывалось влияние на человеческие судьбы, и, дабы умилостивить их, дни недели посвящались им.

В наше время лунный календарь принят в ряде стран Азии и Аравии. В нем календарный год содержит 354 дня (иногда 355 дней) и состоит из 12 месяцев, чередующихся по длительности в 30 и 29 суток, что дает среднюю продолжительность месяца в 29,5 суток, близкую к периоду смены лунных фаз. Началом каждого месяца считается день первого вечернего появления Луны в фазе узкого серпа.

В Древнем Египте, стране земледельческой, за три тысячи лет до нашей эры был создан солнечный календарь, первоначально предназначавшийся для предвычисления дней ежегодных разливов Нила, от которых зависело ороше-

---

[1] См.: Селешников С.И. История календаря и хронология. М., 1977.

[2] Лунной фазой (от греческого «фазис» — проявление) называется вид Луны. О причине смены лунных фаз рассказано в главе V

[3] От греческого «мениское» — лунный серп.

ние полей и обилие урожая. Из длительных наблюдений выяснилось, что разлив Нила наступает через несколько дней после первого появления на фоне утренней зари самой яркой звезды Изиды-Сотис[1], до этого невидимой на протяжении около трех недель (вспомним видимое годовое движение Солнца). Между двумя первыми утренними появлениями этой звезды проходило около 360 суток, и поэтому первый египетский солнечный календарь содержал 360 дней и состоял из 12 месяцев по 30 суток каждый.

Для счета времени эклиптика была разделена по числу дней в году на 360 частей — градусов. Это деление окружности на 360° оказалось настолько удобным, что сохранилось до настоящего времени.

Значительно позже, во втором тысячелетии до нашей эры, египетские жрецы по предутреннему появлению звезд уточнили продолжительность солнечного года до 365 суток. Поэтому египетский солнечный календарь стал содержать 365 дней, отличаясь от тропического года примерно на 6 часов, или на 0,25 суток. Добавленные 5 дней не включались ни в один месяц, их прибавляли в конце года и посвящали религиозным торжествам. По истечении этих пяти дней наступал новый год.

До 45 г до н. э. в истории Древнего Рима сменилось несколько календарей. Первоначально календарный год состоял из 10 месяцев и начинался весной, с марта месяца, названного в честь особо чтимого божества римлян бога войны Марса. Название второго месяца года (апрель) произошло от латинского *apriare* — согревать Солнцем, так как в этот месяц уже становится тепло. Третий месяц, май, назван в честь Майи — богини Земли, а четвертый месяц, июнь, — в честь богини Юноны, супруги главного бога римской мифологии Юпитера. Остальные месяцы обозначались порядковыми числительными: квинтилис (пятый), секстилис (шестой), септембер (седьмой), октобер (восьмой), новембер (девятый) и децембер (десятый)[2]

В VII в. до н. э. римляне перешли на лунный календарь, в котором год продолжительностью в 355 суток содержал 12 месяцев (4 месяца по 31 дню, 7 месяцев по 29 дней и последний месяц — 28 дней). Одиннадцатый месяц был назван январем, в честь двуликого бога времени Януса, одновременно созерцавшего прошедшее и будущее; двенадцатый месяц, февраль, посвящался богу подземного царства Фебруусу и символизировал обряд очищения (по-латыни *februarius*), проводившийся ежегодно в середине этого месяца, незадолго до начала нового года.

Будучи календарем лунным, римский календарь расходился с сезонами года, и, чтобы весна всегда наступала в марте, жрецы через каждый календарный год добавляли тринадцатый месяц продолжительностью в 22 и 23 дня. Таким образом, на протяжении четырех лет календарные годы последовательно содержали 355, 377, 355 и 378 дней, т. е. средняя продолжительность календарного года составляла 366,25 суток, или на одни сутки больше тропического года. Чтобы ликвидировать это расхождение, жреческая каста время от времени то уменьшала, то увеличивала продолжительность добавочного месяца и до того запу-

---

[1] Слеза богини Изиды, по поверью, переполнявшая реки, вызывала их разлив. Эта звезда теперь называется Сириусом (α Большого Пса).

[2] Названия происходят от латинских количественных числительных: *quinque* — пять; *sex* — шесть; *septem* — семь; *octo* — восемь; *novem* — девять; *decem* — десять.

тала календарь, что даже праздник жатвы пришелся на зиму. Эту путаницу в римском календаре очень метко охарактеризовал французский просветитель Ф. Вольтер[1] (1694—1778): «Римские полководцы всегда побеждали, но они никогда не знали, в какой день это случалось».

Конец путанице был положен римским диктатором Юлием Цезарем (100—44 до н. э.). Ознакомившись с египетским календарем, Юлий Цезарь решил ввести этот календарь, с соответствующей поправкой, в Риме. Разработка календаря была поручена египетскому астроному Созигену из города Александрии, крупного астрономического центра того времени.

Созиген принял среднюю продолжительность календарного года равной 365,25 суток, назвав ее юлианским годом (в честь Юлия Цезаря). Поскольку каждый календарный год должен содержать целое число суток, то было принято считать в трех последовательных годах по 365 дней (простые года), а в каждом четвертом году — 366 дней (високосные года), что в среднем составляет $(3 \cdot 365 + 366) : 4 = 365^{д},25$. В календарном году сохранилось 12 месяцев с прежними названиями и с чередованием по 31 дню в нечетных по счету месяцах и по 30 дней в четных, за исключением последнего месяца года, февраля, на долю которого в простом году оставалось 29 дней, а в високосном — 30 дней.

Реформа календаря была закончена в 46 г. до н. э. Указом Юлия Цезаря новый, юлианский календарь был введен в действие с 1 января 45 г до н. э. Этим же указом началом календарного года объявлялось 1 января, и, таким образом, укороченный месяц февраль оказался вторым по счету. Через год, в честь Юлия Цезаря, римский сенат переименовал месяц квинтилис в июль.

Однако высший совет жрецов, которому было поручено следить за правильностью чередования простых и високосных годов, опять внес путаницу в календарь. Ее обнаружили лишь в 8 г. до н. э. при императоре Цезаре Августе, который вновь исправил календарь. В ознаменование этого восьмой месяц года (секстилис) был переименован в август и ему вместо прежних 30 приписали 31 день, в связи с чем пришлось отнять от февраля один день. Попутно несколько изменили число дней в четырех последних месяцах года и окончательно установили современную продолжительность месяцев: январь — 31 день; февраль — 28 (29)[2] дней; март — 31 день; апрель — 30; май — 31; июнь — 30; июль — 31; август — 31; сентябрь — 30; октябрь — 31; ноябрь — 30; декабрь — 31 день.

Календарный год, содержащий 365 суток, называется простым, а содержащий 366 суток — високосным, но этот термин произошел не от слова «высокий». Дело в том, что в Древнем Риме не было последовательного счета календарных дат, а нумерация дней шла в обратной последовательности и, в частности, по числу дней, оставшихся от середины месяца до начала следующего месяца (календ). Поэтому современная нам дата 24 февраля считалась у римлян шестым днем до мартовских календ (т. е. по 1 марта включительно). Дополнительный день вставлялся перед 24 февраля и во избежание нарушения нумерации предыдущих дней именовался повторным шестым днем до мартовских календ. От латинских слов *bis* (повторный) и *sextilis* (шестой) произошло название удлиненного года *bissextilis* (биссекстилис), которое в русском языке превратилось в високосный.

---

[1] Его настоящая фамилия была Аруэ.

[2] 28 дней в простом и 29 дней в високосном году.

Правило счета простых и високосных годов в юлианском календаре очень несложно: года, номера которых делятся на 4, считаются високосными, а остальные — простыми. Например, 1600, 1700, 1800, 1948, 1976 годы високосные (по 366 суток), а 1603, 1770, 1885, 1973 годы простые (по 365 дней).

В юлианском календаре сохранена древневавилонская семидневная неделя, каждый день которой назван в честь одного из семи светил — Солнца, Луны и известных в те времена пяти планет.

Русские названия дней недели самобытные и не связаны с поверьями. Воскресенье долгое время называлось седмицей (седьмым днем) или неделей (день отдыха, в который по работе ничего не делают); понедельник — день, следующий после недели (дня отдыха); вторник — второй день; среда — середина семидневной недели; четверг — четвертый и пятница — пятый день. И только названия двух дней имеют религиозное происхождение: суббота — от древнееврейского «саббат» (отдых, покой) и воскресенье — в честь воскресения мифического Христа из мертвых. У многих славянских народов названия шести дней недели такие же, как русские, а воскресенье по-прежнему называется неделей.

Постепенно юлианский календарь, ныне известный под названием старого стиля, был принят во всех странах, где господствовала христианская религия. В русские земли он проник вместе с христианской верой из Греции, в самом конце X столетия н. э.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ НАШЕЙ, ИЛИ НОВОЙ, ЭРЫ

В каждом календаре или летосчислении устанавливают начало счета годов, называемое эрой. В древние времена это делали по разным событиям, как реальным, так и мифическим (выдуманным). Так, в Древнем Египте эры устанавливали по годам воцарения фараонов, в Древнем Китае — от начала царствования императоров, в Древнем Риме — сначала по именам консулов, затем «от основания Рима» (соответствует 753 г. до н. э.) и наконец по императорам. В еврейском календаре за начало летосчисления принят день мифического «сотворения мира» (3671 г. до н. э.), а в средневековой Греции и в России счет годов тоже исчислялся от «сотворения мира», но оно было отнесено к 5508 г. до н. э. Все это сильно затрудняло хронологию событий и связи между государствами. Поэтому римский ученый монах Дионисий Малый предложил считать года не от принятой тогда эры римского императора Диоклетиана[1], а от новой эры, названной им эрой от рождества Христова — мифического сына божьего, реально никогда, как и бога, не существовавшего. Дионисий объявил, что 248 год эры Диоклетиана соответствует 532 году от рождества Христова, и рекомендовал следующий год нумеровать 533 годом. Так возникла новая, или наша, эра, которая продолжается до сих пор и в которой не было ни первого, ни сотого, ни пятисотого года.

Число 532 было взято Дионисием потому, что по нему легко вычислять даты празднования пасхи на много лет вперед, чем Дионисий и занимался. Дело в том, что еще в 432 г. до н. э. древнегреческий астроном и математик Метон установил, что 110 месяцев по 29 дней и 125 месяцев по 30 дней в сумме составляют 6940 дней и столько же суток содержится в 19 тропических годах. Поэтому в лунно-солнеч-

[1] Первый год эры Диоклетиана соответствует 284 г. н. э.

ных и солнечных календарях через каждые 19 лет одинаковые лунные фазы приходятся на одни и те же календарные числа месяца. Этот 19-летний период известен в астрономии под названием круга Луны или метонова цикла.

Дионисий рассуждал так: полнолуния наступают в одни и те же календарные числа месяца через 19 лет (метонов цикл), пасха празднуется только в воскресенье, которое бывает раз в 7 дней, период високоса равен 4, следовательно, через каждые 532 года $(19 \cdot 7 \cdot 4)$ пасхальное воскресенье приходится на одну и ту же дату. Составив на основе этого таблицу, можно заранее знать даты пасхи на много лет вперед. Такая таблица существует и называется пасхалией.

Таким образом, новая, или наша, эра чисто произвольна, не связана ни с каким историческим событием и является такой же мифической, как и эра «от сотворения мира». Новая эра завоевала себе признание далеко не сразу. В Риме она начала внедряться с 533 г., но окончательно утвердилась лишь в середине XV в., во Франции впервые введена в VIII в., а в России — лишь с 1 января 1700 г. До этого на Руси счет годов велся «от сотворения мира», и новый год ранее начинался 1 марта (мартовский стиль), а с 1492 г — 1 сентября (сентябрьский стиль). Указом Петра I начало года было перенесено на 1 января и введена новая эра.

Во избежание путаницы в последовательности исторических событий, зафиксированных в различных эрах, теперь вся хронология событий перечислена на новую эру и древние года считаются годами до нашей эры (до н. э.).

СОВРЕМЕННЫЙ КАЛЕНДАРЬ И ПРОЕКТЫ ЕГО РЕФОРМЫ

Юлианским календарем (старым стилем) пользовались свыше 1600 лет Но так как тропический год $(365^{д}5^{ч}48^{м}46^{с})$ короче юлианского года $(365^{д}6^{ч})$ на $11^{м}14^{с} = 0^{д}{,}0078$, то моменты равноденствий и солнцестояний по этому календарю ежегодно наступают на $11^{м}14^{с}$ раньше, чем в предыдущем году, а через каждые 128 лет сдвигаются на сутки вперед $(0^{д}{,}0078 \cdot 128 = 0^{д}{,}9984 \approx 1^{д})$. В 325 г., когда на Никейском соборе были установлены дни христианских религиозных праздников, весеннее равноденствие приходилось на 21 марта, а к 1570 г сместилось на 10 суток и произошло 11 марта. Этот сдвиг вызвал расхождение между установленными датами христианских религиозных праздников и явлениями природы. Поэтому в Риме был объявлен конкурс на проект реформы календаря. Наилучшим оказался и был принят проект, разработанный итальянским математиком и врачом Луиджи Лилио (1520—1576), опубликованный в 1576 г. В нем предлагалось исключить из счета 10 дней и тем самым вернуть день весеннего равноденствия на 21 марта, а чтобы впредь учитывать накапливающееся за год различие в $11^{м}14^{с}$, через каждые 400 лет выбрасывать из счета по 3 суток. Правда, за 400 лет расхождение составляет $0^{д}{,}0078 \cdot 400 = 3^{д}{,}12$, но эта неточность в $0^{д}{,}12 = 2^{ч}53^{м}$ даст погрешность в одни сутки лишь за 3333 года и ею можно пока пренебречь.

Своим распоряжением (буллой) от 24 февраля 1582 г римский папа Григорий XIII ввел новый календарь в действие, приказав после четверга 4 октября сразу считать пятницу 15 октября (вместо 5 октября) 1582 г. Этот календарь теперь известен под названием григорианского календаря или нового стиля. В нем чередование простых и високосных годов в пределах каждого столетия ведется так же, как в юлианском календаре, но последний год столетия считается високосным только в том случае, если номер столетия делится на четыре.

Таким образом, в юлианском календаре года 1700, 1800 и 1900 считаются високосными, а в григорианском календаре — простыми, и тем самым за 400 лет, с 1600 по 2000 г., исключается трое суток. Расхождение в счете дней происходит 29 февраля по старому стилю, так как в новом стиле этот день считается 1 марта. Это нужно иметь в виду при пересчете дат из одного стиля в другой. Теперешнее различие в счете, равное 13 суткам, просуществует по 28 февраля 2100 года.

Григорианский календарь был введен из чисто религиозных соображений и принят далеко не сразу из-за распрей между различными направлениями в христианской религии. Так, в Норвегии и Дании он вступил в действие лишь с 1 марта 1700 г., в Англии — с 14 сентября 1752 г., в Болгарии — с 14 апреля 1916 г. В России Высший церковный совет (синод) вообще отказался его вводить, и он был узаконен лишь при Советской власти. Декретом Советского правительства от 25 января 1918 г. было приказано после 31 января сразу считать 14 февраля 1918 г., и тем самым наша страна получила календарь, принятый в подавляющем большинстве культурных стран мира.

Григорианский календарь имеет неудобства, доставшиеся ему в наследие от юлианского календаря: длительность месяцев неодинакова, число дней в месяцах не чередуется в правильной последовательности, месяцы не содержат целого числа недель. Поэтому неоднократно предлагалась новая реформа календаря, но ее имеет смысл проводить только в международном масштабе.

Предложено много проектов всемирного календаря, из которых полезно ознакомиться с тремя. Первый из них предлагает разделить год на 13 месяцев, по 4 недели и по 28 дней в каждом. Тогда любой месяц будет начинаться с воскресенья (или с понедельника), а каждая дата будет приходиться всегда на один и тот же день недели. Общее число дней в календарном году составит $13 \cdot 28 = 364$ суток, и один день предлагается включить перед 1 января, не относя его ни к какому месяцу. В високосные годы между июнем и июлем включается еще один дополнительный день.

Второй проект предлагает сохранить 12 месяцев в году, а год разделить на 4 квартала, в каждом из которых первый месяц содержит 31 день, а два последующих — по 30 дней. Тогда каждый квартал будет начинаться с одного и того же дня недели (воскресенья или понедельника) и состоять из 91 суток. Общее число дней в году составит 364, а дополнительные дни вводятся так же, как и в предыдущем проекте.

Третий проект предлагает ввести шестидневную неделю, чтобы каждый месяц содержал по 5 недель, т. е. по 30 дней. Календарный год будет состоять из 360 суток, а недостающие дни должны включаться по одному в конце каждого квартала и один — в конце года. В високосные годы еще один день должен вводиться в середине года, перед началом июля.

ДАТЫ РАВНОДЕНСТВИЙ И СОЛНЦЕСТОЯНИЙ

Теперь можно объяснить, почему равноденствия и солнцестояния иногда приходятся на даты, смежные с 21 марта, 21 июня, 23 сентября и 22 декабря. Во-первых, тропический год ($365^д 5^ч 48^м 46^с$) не содержит целого числа суток. Поэтому за три простых года моменты равноденствий и солнцестояний запаздывают относительно календарных моментов времени почти на 18 ч, а в високосные годы, из-за включения лишнего дня в февраль, могут попасть на предыдущую

дату. Так, в простом 1970 г. весеннее равноденствие наступило 21 марта в $0^ч50^м$ по гринвичскому (всемирному) времени, в следующем, тоже простом 1971 г — 21 марта в $6^ч33^м$ (т е. через $365^д5^ч48^м$), а в високосном 1972 г вместо 21 марта в $12^ч26^м$ оно наступило 20 марта в $12^ч26^м$, так как один календарный день был отдан февралю.

Во-вторых, одна и та же календарная дата наступает не сразу на всей Земле. Если, например, весеннее равноденствие произойдет 21 марта в $22^ч16^м$ по гринвичскому времени, то в этот момент в Советском Союзе будет уже 22 марта и притом различные часы суток, в зависимости от принадлежности населенных пунктов к часовым поясам. Поэтому, строго говоря, моменты равноденствий и солнцестояний (как, впрочем, моменты всех других явлений) всегда должны указываться в определенной системе счета времени. В астрономии такой системой счета служит среднее гринвичское, или всемирное, время, используемое во многих астрономических календарях-ежегодниках. В «Школьном астрономическом календаре» моменты указываются по московскому времени.

ГЛАВА III

ПЛАНЕТНАЯ СИСТЕМА

ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ПЛАНЕТАХ

Вокруг Солнца движется целая семья небесных тел: девять больших планет со своими спутниками, около 2000 астероидов (или малых планет), несколько тысяч комет, множество метеоритных и метеорных тел, метеорные потоки и плоское облако мельчайшей космической пыли. Вся совокупность этих тел называется Солнечной системой, динамическим (т. е. силовым) центром которой служит Солнце.

Большие планеты удалены от Солнца в следующем порядке (рис. 34): Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон. Все они — холодные, темные (т. е. не излучающие света) шарообразные тела, сопоставимые друг с другом по размерам. Очень часто их называют планетами, опуская прилагательное «большие», чем мы тоже будем пользоваться в дальнейшем.

Малые планеты (астероиды) имеют сравнительно небольшие размеры, в десятки, сотни и тысячи раз меньшие диаметра Земли, и представляют собой твердые глыбы неправильной формы. Только у четырех самых крупных астероидов она, вероятно, близка к шаровой. Почти все малые планеты движутся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя своеобразное кольцо, называемое поясом или зоной астероидов.

Планеты и астероиды видны потому, что освещаются Солнцем. Они обращаются вокруг Солнца в направлении движения Земли, которое считается прямым, и составляют планетную систему, являющуюся частью Солнечной системы. Размеры планетной системы, по нашим земным представлениям, огромны: ее диаметр близок к 12 млрд. км, и последняя планета Плутон, удаленная от Солнца почти в 40 раз дальше Земли, совершает один оборот вокруг него почти за 250 лет. Чтобы наглядно представить размеры планетной системы и ничтожные в

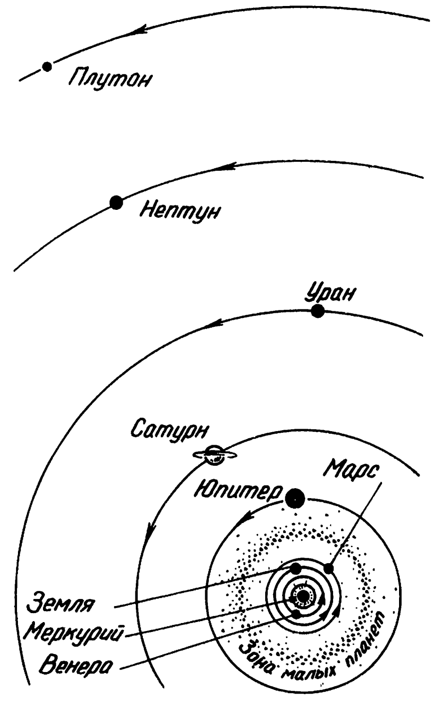


Рис. 34. Планетная система.

сравнении с нею размеры планет, вообразим себе модель, в которой Земля изображена дробинкой диаметром 1 мм. Тогда Солнце изобразится шаром диаметром 11 см, а планеты — дробинками и шариками различных размеров, расположенными от шара — Солнца на расстояниях, указанных в нижеследующей таблице:

Планета	Диаметр дробинки, в мм	Расстояние от шара — Солнца		Планета	Диаметр шарика, в мм	Расстояние от шара — Солнца	
		в м	в относительных единицах			в м	в относительных единицах
Меркурий	0,4	4,5	0,39	Юпитер	11,0	61	5,20
Венера	0,9	8,5	0,72	Сатурн	9,1	112	9,54
Земля	1,0	11,7	1,00	Уран	3,9	224	19,19
Марс	0,5	17,8	1,52	Нептун	3,8	352	30,07
Астероиды	мелкие пылинки	24—50	2,06—4,29	Плутон	0,2	462	39,50

В этой модели пылинки, разбросанные вокруг центрального шара на расстояниях от 24 до 50 м, демонстрируют расположение пояса астероидов в планетной системе. Таким образом, даже соседние планеты удалены друг от друга на расстояния, в тысячи и десятки тысяч раз превышающие размеры самих планет

Но как ни велики размеры планетной системы, все же и они ничтожно малы в сравнении с расстояниями даже до ближайших звезд. Ведь наша модель планетной системы разместится на площадке диаметром около 925 м, а шар, изображающий ближайшую звезду, должен быть расположен на расстоянии 3200 км! (см. с. 15). Именно, из-за своей колоссальной удаленности звезды кажутся нам неподвижными, в то время как относительная близость планет и астероидов позволяет наблюдать их движение на фоне звездного неба.

Малые планеты имеют столь небольшие размеры, что даже в сильные телескопы выглядят светящимися точками, за что и получили название астероидов, т. е. по-гречески звездообразных объектов. Ни один из астероидов не виден невооруженным глазом.

Далекие планеты Уран, Нептун и Плутон, скудно освещаемые Солнцем, доступны наблюдениям лишь в телескопы. Уран выглядит слабой звездочкой почти шестой звездной величины (6^m), и его диск диаметром около 4″ уже заметен в небольшой телескоп школьного типа, при увеличении в 80 раз. Блеск Наптуна близок к 8^m, а его диск (около 2″,5) виден при увеличении не менее 120 раз. Отыскивать эти планеты на небе нужно по данным астрономических календарей-ежегодников, ориентируясь по звездам, вблизи которых находятся планеты.

Что касается Плутона, то не следует пытаться разыскивать его на небе: блеск планеты около 15^m, и для ее наблюдений необходимы телескопы с диаметром объектива не менее 40 см.

Остальные, более близкие к Солнцу планеты обильно освещаются Солнцем и хорошо видны невооруженным глазом (кроме, конечно, Земли). Именно поэтому уже древним народам было известно пять планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн.

Планеты перемещаются по зодиакальным созвездиям вблизи эклиптики, что доказывает очень малые наклоны их пространственных траекторий (планетных орбит) к плоскости земной орбиты, и поэтому, в первом приближении, планетная система может считаться плоской. Исключением является орбита Плутона, наклоненная к эклиптике под углом 17°, из-за чего в настоящее время Плутон находится вдали от эклиптики, у самой северной границы зодиакального созвездия Девы. В дальнейшем мы рассмотрим только большие планеты.

ВИДИМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Еще в глубокой древности было замечено, что планеты, перемещаясь по зодиакальным созвездиям, бóльшую часть времени движутся в направлении с запада к востоку, но постепенно их движение замедляется, они останавливаются (наступает стояние), затем некоторое время движутся в противоположном направлении, снова останавливаются и после этого продолжают свой путь к востоку. Движение планет в направлении с запада к востоку считается прямым, а в противоположном направлении — попятным. Таким образом, видимый путь планеты на небе получается петлеобразным (рис. 35).

Форма и размеры описываемых планетами петель различны, как различны и промежутки времени их прямого и попятного движения. У Меркурия дуга попятного движения составляет около 13°, у Венеры — примерно 16°, у Марса — близка к 15°, у Юпитера — немногим более 10°, а у Сатурна — приблизительно 7°.

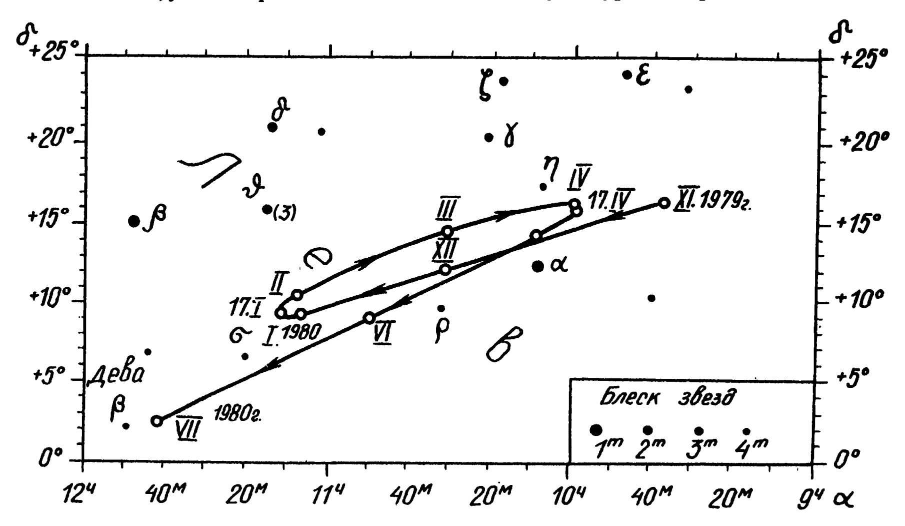


Рис. 35. Видимый путь Марса по созвездию Льва с ноября 1979 г по июнь 1980 г. (Римские цифры означают первые числа месяцев.)

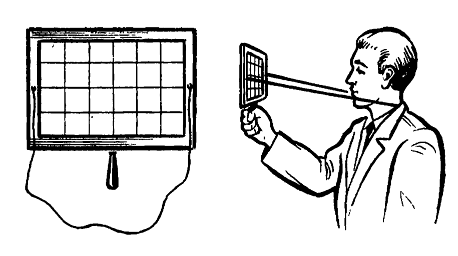


Рис. 36. Рамка для наблюдений положений планет.

Чтобы изучить видимое движение планет, необходимо систематически следить за их положением относительно звезд. При наличии угломерного инструмента (универсального инструмента или теодолита) следует регулярно измерять угловые расстояния планеты от выбранных в качестве ориентиров двух-трех звезд, отмечая время с точностью до 10 мин. Если угломерного инструмента нет, то можно проводить измерения сквозь самодельную рамку с внутренними размерами 21 × 14 см и натянутыми на ней через каждые 3,5 см белыми нитями. К нижней планке рамки нужно прикрепить ручку, а к середине боковых планок — шнур такой длины, чтобы он, будучи накинутым на шею, фиксировал рамку на расстоянии 40 см от глаз наблюдателя (рис. 36).

При наблюдениях рамку устанавливают на штативе или держат за ручку. Какой-либо крест нитей нужно всегда наводить на одну и ту же звезду вблизи планеты, а ее положение отмечать относительно сетки нитей. Помечая положение планеты на звездной карте (или лучше на копии с нее) на протяжении нескольких дней или недель, легко заметить перемещение планеты. Если проводить наблюдения несколько месяцев, то можно убедиться в петлеобразной форме ее видимого пути.

Петлеобразные участки видимого пути планет могут находиться в разных зодиакальных созвездиях, но в расположении этих участков имеется существенное различие. Весь пояс зодиакальных созвездий Марс обходит за 687 суток, Юпитер — почти за 12 лет, а Сатурн — за 29,5 года. Эти три планеты периодически бывают вблизи Солнца и тогда не видны, затем постепенно отстают от него к западу и в области неба, противоположной Солнцу, всегда описывают очередную петлю. В зависимости от расположения относительно Солнца эти планеты бывают видны в различные часы темного времени суток, в том числе и на протяжении всей ночи.

Меркурий и Венера всегда находятся вблизи Солнца, удаляясь от него попеременно к западу и к востоку не более 28° (Меркурий) и 48° (Венера). Благодаря близости к Солнцу эти две планеты бывают видны только в восточной области неба под утро, до восхода Солнца, либо в западной стороне по вечерам, скрываясь за горизонтом вскоре после его захода. Меркурий и Венера движутся петлеобразно вблизи Солнца и вместе с ним за год обходят весь Зодиак. Таким образом, видимое движение Меркурия и Венеры значительно отличается от видимого движения Марса, Юпитера и Сатурна. Перемещение же Солнца и Луны на фоне звезд происходит по большим кругам всегда в прямом направлении.

ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МИРА

Древнегреческие мыслители, пытаясь представить себе строение мира (Вселенной), объяснить видимые движения небесных светил и предвычислять их положение на небе, создавали геометрические модели (построения), известные

под названием геоцентрических систем мира[1]. В этих системах центром Вселенной считалась неподвижная Земля, а все небесные светила — обращающимися вокруг нее. Такой взгляд на природу в те далекие времена был вполне закономерен, так как непосредственно вытекал из наблюдений: никаких признаков вращения Земли не обнаруживалось, зато наблюдалось равномерное суточное вращение неба вместе со светилами вокруг Земли. Поэтому равномерное движение по окружности считалось совершенным (идеальным) и приписывалось всем без исключения небесным светилам.

Суточное вращение звезд объяснялось просто: считалось, что звезды находятся на внутренней поверхности математической сферы, которая равномерно вращается вокруг Земли. Но чтобы объяснить перемещение Солнца, Луны и неравномерное, петлеобразное движение планет по звездному небу, не нарушая принципа совершенного движения по окружности, приходилось создавать сложные построения из большого числа геометрических сфер, различных по своим размерам.

Древнегреческий математик и астроном Евдокс (около 408—355 до н. э.) объяснял петлеобразное движение планет комбинацией 26 чисто умозрительных геометрических сфер. Выдающийся философ и создатель древней физики Аристотель (384—322 до н. э.), пытаясь усовершенствовать геоцентрическую систему мира, увеличил число сфер до 56 и объявил их прозрачными, хрустальными, реально существующими. Считая шарообразную Землю центром Вселенной, ограниченной хрустальной сферой со звездами, Аристотель учил о резком отличии всего небесного от земного. Согласно Аристотелю, небесные светила состоят из эфира — особого светоносного, невесомого, вечного и неизменного вещества. Круговое движение — самое совершенное, и поэтому небесные светила могут двигаться только равномерно по кругам. Движущееся тело не может быть центром кругового движения других тел, поскольку тогда пути этих тел не будут круговыми.

Однако некоторые древние мыслители придерживались иного мнения. Так, Аристарх Самосский (около 310—230 до н. э.), получивший свое прозвище от острова Самос, где он родился, учил о вращении Земли и ее обращении вокруг Солнца. Но авторитет Аристотеля был настолько велик, что не позволил воспринять правильного учения Аристарха, опередившего астрономическими исследованиями свою эпоху на 18 столетий. Даже его выдающийся современник Архимед (287—212 до н. э.) не понял нового учения и остался сторонником геоцентрической системы мира. Зато жрецы обвинили Аристарха в богохульстве, и под страхом смерти Аристарх вынужден был бежать из Афин. Правильные научные взгляды Аристарха Самосского на вращение Земли и ее обращение вокруг Солнца были надолго изгнаны из науки, так как не было еще исторических условий к их восприятию.

Многовековые астрономические наблюдения подытожил во II в. н. э. (около 140—142 гг.) выдающийся александрийский астроном Клавдий Птолемей (70—147 н. э.). Будучи сторонником учения Аристотеля, он разработал математическую теорию движения Солнца, Луны и планет, позволяющую с большой по тому времени точностью предвычислять видимые положения этих светил на небе. Разработанная Птолемеем геоцентрическая система мира была

[1] От греческого «Гея» — Земля, т. е. Земля — в центре мира.

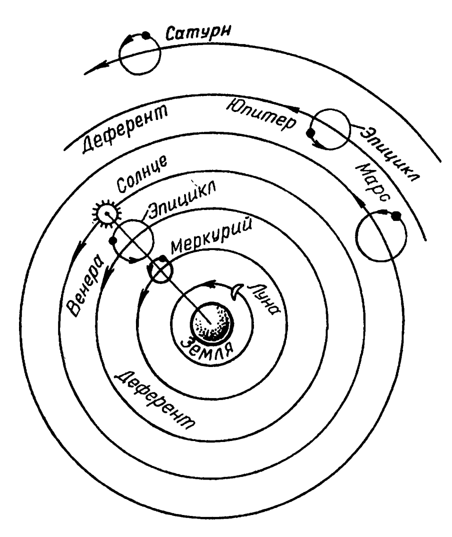


Рис. 37 Геоцентрическая система мира Птолемея.

очень сложна; ее упрощенная схема представлена на рисунке 37. В соответствии со скоростью видимого перемещения светил Птолемей расположил их в следующей последовательности от Земли: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн и звезды, находящиеся на сфере, ограничивающей Вселенную. С тех пор Меркурий и Венера, расположенные в системе Птолемея ниже Солнца, стали называться нижними планетами, а остальные планеты — верхними[1].

В системе Птолемея вращение небесной сферы вокруг Земли с востока на запад объясняет восход и заход светил. Помимо этого, Солнце и Луна равномерно движутся вокруг Земли в прямом направлении (с запада к востоку) по большим кругам — деферентам[2]. Планеты тоже равномерно и в прямом направлении движутся по малым кругам — эпициклам[3], а центры эпициклов равномерно движутся в прямом направлении по своим деферентам. Сочетание движений планет по эпициклам с движением эпициклов по деферентам должно было объяснить видимое петлеобразное движение планет.

Чтобы объяснить особенности видимого движения нижних планет — Меркурия и Венеры, Птолемей вынужден был расположить центры их эпициклов на одной прямой, соединяющей Землю с Солнцем, и считать периоды их обращения по деферентам равными, как и у Солнца, одному году. Эпициклы верхних планет не были связаны с Солнцем. Периоды их обращения по деферентам были различными, но зато каждая планета должна была двигаться по ближайшей к Земле дуге эпицикла (попятное движение) именно в тот период времени, когда сам эпицикл располагался в стороне неба, противоположной Солнцу. Таким образом, движение всех планет в системе Птолемея невольно связывалось с Солнцем, а не с Землей.

В свое время система Птолемея сыграла большую роль в науке, так как позволяла предвычислять видимое положение планет и побуждала астрономов совершенствовать их наблюдения с целью уточнения теории движения планет.

Христианство, быстро распространявшееся во II—IV вв. н. э. в Европе, постепенно превратилось в государственную религию многих европейских государств, стало мощным орудием правящего класса феодалов и надолго затормозило развитие живой мысли в Европе. Руководители церкви объявили

---

[1] Это разделение планет на нижние и верхние сохранилось до сих пор, но только теперь их разграничивает орбита Земли.

[2] От латинского *deferens* — несущий.

[3] От греческих слов «эпи» — на и «киклос» — круг.

учение Аристотеля о противоположности земного небесному и геоцентрическую систему мира Птолемея непререкаемыми научными истинами. Любые сомнения в реальности этой системы и в истинности христианского учения, служащего феодальному строю, объявлялись еретическими, т е. противными христианской вере, и беспощадно подавлялись, вплоть до физического уничтожения инакомыслящих.

Между тем развивающееся мореплавание требовало для ориентировки кораблей вдали от берегов составления астрономических таблиц, в которых были бы указаны с наибольшей возможной точностью видимые положения планет на много лет вперед. Такие таблицы вычислялись по геоцентрической системе Птолемея. Со временем, при возраставшей точности наблюдений, стали обнаруживаться большие расхождения между вычисленными и наблюдаемыми положениями планет. Однако исправлять систему Птолемея можно было только добавлением новых эпициклов, сохраняя центральное положение Земли. К середине XIII в. общее число эпициклов достигло 70 и настолько запутало вычисления видимых положений планет, что несостоятельность системы Птолемея стала очевидной.

ЭПОХА ВОЗРОЖДЕНИЯ И РЕВОЛЮЦИЯ В АСТРОНОМИИ

Несмотря на жестокие репрессии со стороны правящих кругов, прогрессивные веяния пробивались сквозь мрачную действительность средневековой Европы. На рубеже XIII и XIV вв. в недрах дряхлеющего феодального общества начали зарождаться предпосылки нового общественного строя — капитализма. К концу XIV — началу XV столетия новые общественные капиталистические отношения охватили многие страны Европы. Началась борьба крепнувшей буржуазии против феодального строя, сковывавшего развитие капиталистических отношений. Эта борьба развертывалась не только в экономике, но и в идеологии, в мировоззрении, так как на основе старого мировоззрения невозможно было победить феодализм. В Европе наступила эпоха Возрождения.

Один из основоположников марксистской философии — Ф. Энгельс так характеризует эпоху Возрождения: «Это был величайший прогрессивный переворот из всех пережитых до того времени человечеством, эпоха, которая нуждалась в титанах и которая породила титанов по силе мысли, страсти и характеру, по многосторонности и учености»[1]. Величайший прогрессивный переворот был произведен и в астрономии — науке, необходимой не только для производственной, но и для идеологической жизни, ниспровергающей мистически-религиозные вымыслы о строении Вселенной. Этот переворот в астрономии совершил великий польский ученый Николай Коперник (1473—1543). Коперник получил образование в университетах Кракова, Болоньи и Падуи, где изучал юриспруденцию, медицину, математику и астрономию (по системе Птолемея). В Италии он ознакомился с книгой Аристарха Самосского, изданной в 1498 г., откуда почерпнул мысли о суточном вращении и годичном обращении Земли. От него не укрылись и противоречия, свойственные геоцентрической системе мира Птолемея, в частности тесная связь движения планет с Солнцем.

Получив ученую степень, Коперник в конце 1503 г. вернулся на родину и по-

---

[1] Энгельс Ф. Диалектика природы. М., 1969, с. 7.

степенно начал создавать новое, гелиоцентрическое учение[1] о строении Вселенной, центром которой он полагал Солнце.

В 1515 г. Коперник изложил свое учение в небольшой рукописи «Малый комментарий о гипотезах небесных движений», которая не была опубликована. Позже он обосновал его математически в книге «О вращении небесных сфер»[2], законченной к 1535 г. По этому учению Солнце является центром мира, вокруг которого по кругам, в прямом направлении равномерно движутся планеты, в том числе и Земля, вращающаяся вокруг оси с запада к востоку. Вокруг Земли движется только Луна. Видимое годовое движение Солнца по эклиптике и петлеобразное движение планет полностью объясняется обращением Земли вокруг Солнца. По повторяющимся на небе расположениям планет относительно Солнца Коперник вычислил их расстояния от него, приняв за единицу измерения расстояние от Земли до Солнца (астрономическая единица — а.е.): Меркурий — 0,4; Венера — 0,7; Земля — 1,0; Марс — 1,5; Юпитер — 5; Сатурн — 10. Таким образом, Земля из центра мира была разжалована в обычную планету, чем подрывались религиозные представления о мире и учение Аристотеля о различии земного и небесного. Но издать свою книгу Коперник согласился лишь в 1542 г. Вышла она в свет в 1543 г., за несколько дней до его кончины.

Величайшая заслуга Коперника перед человечеством состоит в том, что он смело выступил против реакционного мировоззрения и, создав свою гелиоцентрическую систему мира, нанес сокрушительный удар по богословию. Освобожденная от религиозных оков наука пошла по материалистическому пути.

Простота и стройность Коперниковой системы мира быстро нашла себе сторонников. Пока новое учение широко не пропагандировалось, церковные власти не обращали на него внимания, и в 1566 г. книга Коперника вышла в свет вторым изданием. Но когда к концу XVI в. коперниканские идеи начали широко распространяться и стали знаменем революционного движения, церковники увидели в них подрыв христианской веры и феодального строя.

Одним из наиболее страстных распространителей учения Коперника был итальянский философ Джордано Бруно (1548—1600), бывший монах, лично убедившийся в лицемерии церковников и лживости религии. Покинув в 1575 г. монастырь, Бруно сначала скитался по Италии, а затем, опасаясь инквизиции, вынужден был оставить родину. В своих блестящих публичных выступлениях и книгах Бруно не только пропагандировал учение Коперника, но и высказывал совершенно необычные для той эпохи воззрения на природу звезд, справедливо полагая их далекими солнцами движущимися в беспредельном пространстве Вселенной. По мысли Бруно, многие звезды, подобно Солнцу, окружены планетами, на которых, как и на Земле, существует разумная жизнь, а материя есть сама по себе живое и активное начало.

Пропаганда новых, материалистических идей находила широкий положительный отклик среди буржуазии и вызывала ярость феодалов и духовенства. В 1591 г. Бруно был заманен в Венецию, арестован и препровожден в Рим. После восьмилетнего заключения и пыток 17 февраля 1600 г. Джордано Бруно

---

[1] От греческого «Гелиос» — Солнце, т. е. Солнце в центре мира.

[2] Книга написана на латинском языке, и ее название различными исследователями переводится по-разному. В частности, возможен такой перевод: «О коренных изменениях небесных орбит».

был сожжен на костре. Но, как ни пытались феодалы и церковники подобными публичными казнями остановить развитие научной мысли, устрашить народ, поддержать авторитет религии и задержать ход истории, все же в этой жестокой борьбе материалистическая наука победила.

Дальнейшее развитие и пропаганда гелиоцентрического учения Коперника в ту эпоху связаны с именами двух великих ученых, переписывавшихся между собой, но никогда не встречавшихся друг с другом. Речь идет о знаменитом итальянском физике и астрономе Галилео Галилее (1564—1642) и не менее известном немецком (точнее, австрийском) математике и астрономе Иоганне Кеплере (1571—1630).



Рис. 38. Луна в фазе, близкой к первой четверти (вид в телескоп).

В 1608 г. в Голландии появились первые оптические подзорные трубы, о которых Галилей узнал в мае 1609 г. Он сам изготовил из оптических стекол (линз) два телескопа: первый давал увеличение всего лишь в 9 раз, второй — в 30 раз и имел длину 1245 мм, а диаметр — 54 мм. С этим несовершенным телескопом Галилей сделал свои знаменитые астрономические открытия, подтвердившие учение Коперника и разрушившие авторитет Аристотеля и Птолемея.

В августе 1609 г. Галилей направил свой телескоп на Луну и открыл на ее поверхности горы и темные низменные области, названные впоследствии морями (рис. 38). Рухнуло учение Аристотеля о коренном отличии небесного от земного, об особом светоносном веществе — эфире, из которого якобы состоят все небесные тела. Луна оказалась таким же материальным холодным шарообразным телом, как Земля, и видна лишь потому, что освещается Солнцем.

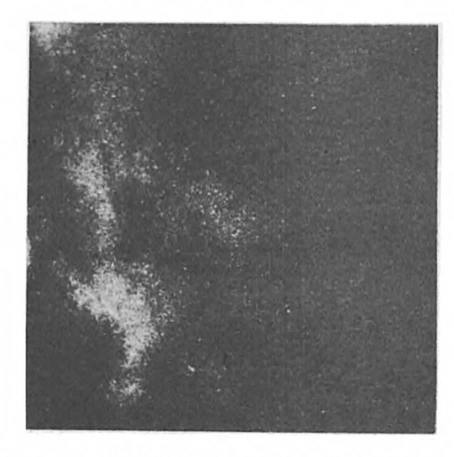


Рис. 39. Фотография участка Млечного Пути.

В конце 1609 и начале 1610 г. Галилей исследовал в телескоп Млечный Путь, объявленный Аристотелем туманным кольцом в земной атмосфере. Галилей опроверг и это мнение Аристотеля: Млечный Путь оказался сгущением колоссального множества слабых звезд, свет которых для невооруженного глаза сливается в сплошное сияние (рис. 39).

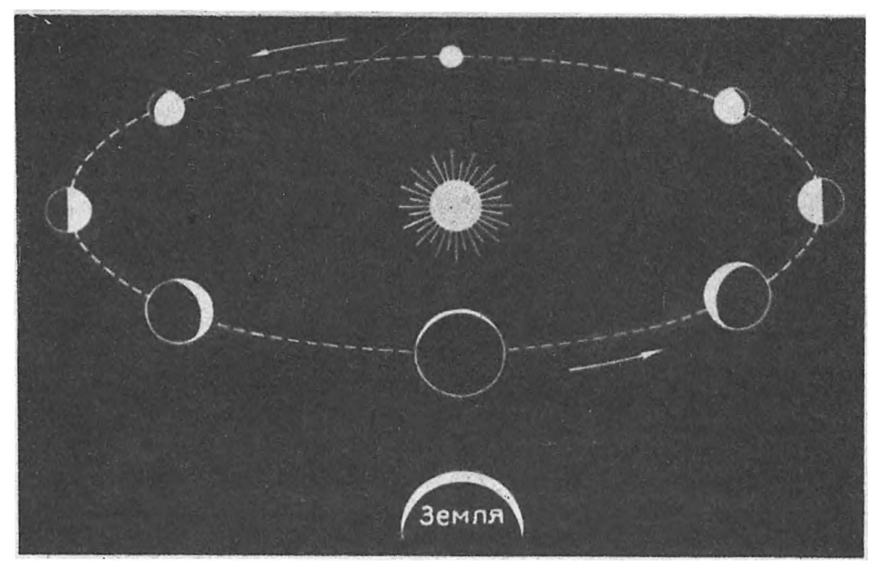


Рис. 40. Смена фаз Венеры.

С 7 по 26 января 1610 г. Галилей в телескоп обнаружил у Юпитера четырех спутников примерно 5-й звездной величины и тщательно следил за их движением вокруг планеты. Это открытие своеобразной модели планетной системы полностью доказывало, что движущееся тело (Юпитер) может быть одновременно центром движения других тел. Становилось вполне ясным, что и в движении Земли вместе с Луной вокруг Солнца нет ничего необычного.

Свои открытия Галилей опубликовал в марте 1610 г. в «Звездном вестнике», в котором смело доказывал справедливость учения Коперника.

В октябре 1610 г Галилей открыл фазы Венеры (рис. 40), свидетельствовавшие о сходстве Венеры с Землей и Луной и об обращении планеты вокруг Солнца. Это открытие нанесло еще один мощный удар по геоцентрическому мировоззрению и открыло широкий путь к признанию учения Коперника.

За пропаганду учения Коперника и своих открытий Галилей был обвинен в пренебрежении «священным писанием». В 1633 г он был заключен в тюрьму и предан церковному суду. Суд приговорил Галилея к пожизненному заключению, замененному запрещением выезда с места жительства. До конца своей жизни Галилей находился под гласным надзором шпионов инквизиции. Суровый приговор был все же отменен... в 1972 г (!).

Последователи коперниканского учения преследовались не только католической и лютеранской, но и русской православной церковью. Сведения о гелиоцентрической системе мира проникли в Россию еще в 1530 г., но первое ее изложение появилось в рукописной книге «Зерцало всея вселенныя» в 1657 г. Книга не была издана, так как православная церковь категорически запрещала буквально все, что не было в согласии со «священным писанием».

Гелиоцентрическая система мира стала широко распространяться в России лишь в эпоху Петра I (1672—1725), который, хорошо понимая значение астро-

номии для картографии и мореходства, был убежденным сторонником учения Коперника и совершенно не считался с мнением безграмотного в науке духовенства.

ИСТИННОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАНЕТ

Выдающийся математик и астроном Иоганн Кеплер был горячим сторонником гелиоцентрической системы мира, которую он изучил в студенческие годы и пытался ее усовершенствовать чисто геометрическими способами, изложенными им в первой своей книге «Предвестник космографических сочинений» (1597). Попытки Кеплера оказались неудачными, но сложные математические расчеты, содержавшиеся в книге, создали Кеплеру имя. На него обратил внимание знаменитый датский астроном Тихо Браге (1546—1601), переехавший в 1597 г. из Дании в Прагу.

В июне 1600 г. Кеплер по приглашению Тихо Браге прибыл в Прагу, чтобы принять участие в составлении новых таблиц планетных движений. Материалом для вычисления новых таблиц послужили многолетние наблюдения планет, в особенности Марса, проведенные Тихо Браге в 1576—1597 гг. на обсерватории Ураниборг, выстроенной им на острове Хвене (в Зундском проливе). Записи Тихо Браге, скончавшегося 13 октября 1601 г., поступили в распоряжение Кеплера.

Свое внимание Кеплер сосредоточил на изучении движения Марса, так как имевшиеся в его распоряжении записи наблюдений этой планеты охватывали 11 периодов ее обращения. Используя данные Коперника, Кеплер сначала изобразил орбиты Земли и Марса окружностями с радиусами 1 и 1,5, а чтобы объяснить неравномерное движение Солнца по эклиптике, сместил его из центра земной орбиты на 1/59 (или 0,017) ее радиуса. Но попытки изобразить орбиту Марса окружностью окончились неудачей: вычисленные положения планеты не совпадали с наблюдаемыми. Тогда Кеплер понял, что многовековое убеждение в круговом движении планет оказалось ложным, и стал подбирать для Марса подходящую орбиту: лучше всего подошла геометрическая фигура, называемая эллипсом.

Образно говоря, эллипс — это сплюснутая окружность. Математика дает ему точное определение: эллипсом называется плоская замкнутая кривая, для любой точки которой сумма расстояний от двух заданных точек (фокусов эллипса) постоянна и равна длине большой оси эллипса (рис. 41). Большая ось эллипса и ее длина обозначаются символом $2a\,(A\Pi = 2a)$; малая ось и ее длина — символом $2b\,(BD = 2b)$. Обе оси — взаимно перпендикулярны и пересекаются в центре O эллипса. Половины осей называются полуосями: большая полуось a $(AO = O\Pi)$ и малая полуось b $(BO = OD)$. На большой оси эллипса,

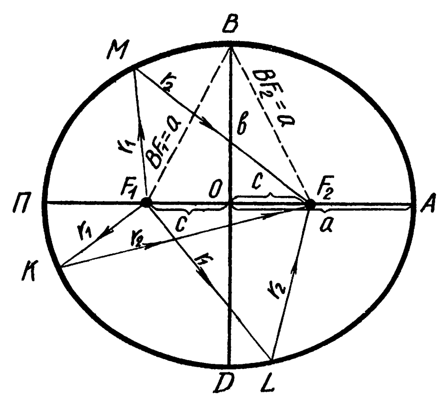


Рис. 41. Элементы эллипса.

на равных расстояниях $c = OF_1 = OF_2$ от его центра, лежат особые точки F_1 и F_2, называемые фокусами. Они характерны тем, что лучи (например, F_1K, F_1L, F_1M), вышедшие из одного фокуса (F_1), после отражения от разных точек (K, L, M) эллипса обязательно пройдут (KF_2, LF_2, MF_2) через другой его фокус (F_2) аналогично тому, как световые лучи собираются в фокусе выпуклой линзы или вогнутого зеркала.

Степень вытянутости эллипса характеризуется эксцентриситетом $e = \frac{c}{a}$.

Пользуясь определением эллипса, можно для любой его точки (например, L, K или M, см. рис. 41) написать равенство

$$r_1 + r_2 = 2a,$$

где r_1 и r_2— расстояния этой точки от фокусов.

Для точек B и D, лежащих на концах малой оси эллипса, тоже действительно равенство

$$BF_1 + BF_2 = DF_1 + DF_2 = 2a,$$

откуда получается $BF_1 = BF_2 = DF_1 = DF_2 = a$, т е. концевые точки B и D малой оси эллипса отстоят от его фокусов на расстоянии a, равном длине большой полуоси. Тогда находим, что

$$b^2 + c^2 = a^2,$$

и так как

$$c = ae,$$

то

$$b = a\sqrt{1 - e^2}$$

Следовательно, при эксцентриситете $e = 0$ оба фокуса эллипса сливаются с его центром, обе полуоси становятся равными ($a = b$) и эллипс превращается в окружность. При малом эксцентриситете вытянутость эллипса незначительна и он мало отличается от окружности. Наоборот, значения e, близкие к 1, характеризуют очень вытянутый эллипс, а при $e = 1$ эллипс не существует — он превращается в разомкнутую кривую, параболу, имеющую лишь один фокус. При $e > 1$ разомкнутая кривая называется гиперболой, ветви которой расходятся резче, чем у параболы.

Все четыре кривых — окружность, эллипс, параболу и гиперболу — называют кривыми второго порядка, поскольку их форма описывается квадратными уравнениями, а также именуют коническими сечениями, так как они образуются при пересечении круглого конуса плоскостями: окружность — плоскостью, перпендикулярной оси конуса; парабола — плоскостью, параллельной его образующей; гипербола — плоскостью, параллельной оси конуса; эллипс — плоскоетью, пересекающей конус под иным углом (рис. 42).

Но вернемся к Кеплеру. Доказав движение Марса по эллиптической орбите, Кеплер поместил Солнце в один из ее фокусов, и тогда все теоретически рассчитанные видимые положения планеты совпали с наблюдаемыми. Большая полуось орбиты Марса оказалась $a = 1{,}52$ (радиуса земной орбиты), а эксцентриситет $e = 1/11$, или $e = 0{,}091$, т. е. Солнце смещено от центра орбиты на рас-

стояние $c = 0{,}091\ a$. Как мы помним, Кеплер нашел аналогичное смещение Солнца от центра земной орбиты $c = 1/59 = 0{,}017$ ее радиуса, и, следовательно, Земля движется тоже по эллиптической, но менее вытянутой орбите ($e = 0{,}017$), мало отличающейся от окружности.

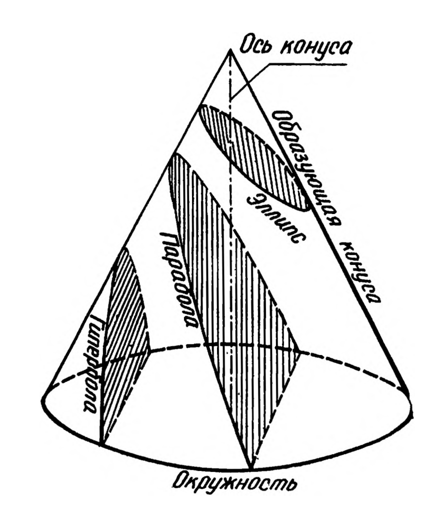


Рис. 42. Конические сечения.

Наблюдения показали, что планеты, перемещаясь вблизи эклиптики, периодически удаляются от нее в обе стороны на небольшие расстояния — в 1° (Юпитер), 2° (Марс и Сатурн), 3° (Венера) и 7° (Меркурий) — подобно тому, как Солнце периодически отходит от небесного экватора на 23°27′. Кеплер правильно объяснил эти удаления планет наклонением плоскостей их орбит к плоскости земной орбиты (плоскости эклиптики).

Результаты своих исследований, продолжавшихся с 1600 по 1605 г., Кеплер изложил в книге «Новая астрономия» (1609) в виде закономерностей, ныне известных под названием первого и второго законов Кеплера.

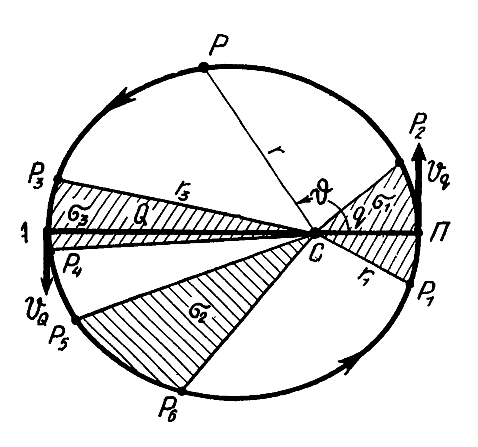


Рис. 43. Законы Кеплера.

Первый закон Кеплера[1]: все планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Следовательно, орбиты всех планет имеют один общий фокус, находящийся в центре Солнца, а плоскости орбит наклонены друг к другу и пересекаются по прямым линиям, проходящим через Солнце.

Наиближайшая к Солнцу C (рис. 43) точка Π орбиты называется перигелием[2], а наиболее удаленная точка A — афелием[3] Обе эти точки лежат на большой оси орбиты по разные стороны от Солнца.

При движении планеты вокруг Солнца ее гелиоцентрическое расстояние, называемое радиусом-вектором ($r = CP$), непрерывно изменяется. В любой момент времени положение планеты на орбите определяется радиусом-вектором (r) и истинной аномалией ($\vartheta = \angle \Pi CP = \overset{\frown}{\Pi P}$), т. е. угловым удалением от перигелия, отсчитываемым в сторону движения планеты. Радиус-вектор r

[1] Исторически этот закон был открыт вторым.
[2] От греческих слов «пери» — около и «Гелиос» — Солнце.
[3] Искаженное «апогелий», от греческих слов «апо» — вдали и «Гелиос» — Солнце.

и истинная аномалия ϑ планеты связаны между собой уравнением эллипса

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\vartheta},$$

где a — большая полуось и e — эксцентриситет орбиты.

За период обращения планеты вокруг Солнца ее истинная аномалия ϑ изменяется в пределах от 0 до 360°, а радиус-вектор r — от наименьшего значения (при $\vartheta = 0°$), называемого перигельным расстоянием ($q = СП$), до наибольшего значения (при $\vartheta = 180°$), т. е. до афелийного расстояния ($Q = СА$). Легко видеть, что перигельное расстояние

$$q = a - c = a(1-e), \tag{3.1}$$

афелийное расстояние

$$Q = a + c = a(1+e), \tag{3.2}$$

а большая полуось орбиты

$$a = \frac{q+Q}{2}$$

и представляет собой среднее расстояние планеты от Солнца.

Среднее гелиоцентрическое расстояние Земли, равное большой полуоси ее орбиты, принимается за единицу измерения расстояний в Солнечной системе и называется астрономической единицей (а.е.). По современным измерениям 1 а.е. = 149,6 10^6 км[1]

Второй закон Кеплера[2], называемый законом площадей: радиус-вектор планеты описывает площади, прямо пропорциональные промежуткам времени.

Следовательно, если за промежуток времени t_1 планета прошла путь $P_1ПP_2$ (см. рис. 43), а за промежуток времени t_2 — путь P_5P_6, то за те же промежутки времени радиус-вектор планеты опишет площади σ_1 (площадь сектора P_1CP_2) и σ_2 (площадь сектора P_5CP_6), причем

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{t_1}{t_2}. \tag{3.3}$$

Площадь, описываемая радиус-вектором планеты в единицу времени, называется ее секториальной скоростью. Из равенства (3.3) следует, что секториальная скорость

$$\nu = \frac{\sigma_1}{t_1} = \frac{\sigma_2}{t_2} = \dots$$

есть величина постоянная для каждой планеты. Поэтому второй закон Кеплера часто формулируется так: секториальная скорость планеты есть величина постоянная.

Секториальную скорость любой планеты легко определить по периоду T

---

[1] Об измерении длины 1 а. е. рассказано на с. 85.
[2] Исторически этот закон был открыт первым.

ее обращения вокруг Солнца. Так как площадь эллипса $\sigma = \pi ab = \pi a^2 \sqrt{1-e^2}$, то секториальная скорость

$$\nu = \frac{\sigma}{T} = \frac{\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{T}. \qquad (3.4)$$

Здесь следует сказать, что промежуток времени, за который планета совершает один оборот вокруг Солнца, называется звездным или сидерическим[1] периодом обращения, поскольку по истечении этого периода верхняя планета, завершив свой путь по Зодиаку, снова возвращается примерно к той же звезде, вблизи которой она находилась вначале. Таким образом, в формулу (3.4) входит сидерический период обращения планеты, хотя часто ради краткости прилагательное «сидерический» (или «звездный») опускается.

Теперь представим себе, что вблизи афелия планета прошла путь P_3AP_4 (см. рис. 43) за такой же промежуток времени t_1, что и путь $P_1\Pi P_2$ вблизи перигелия. Тогда, согласно второму закону Кеплера, площадь $\sigma_3 = \sigma_1$, но так как $r_3 > r_1$, то дуга P_3AP_4 меньше дуги $P_1\Pi P_2$. Иными словами линейная скорость (v) планеты плавно меняется с расстоянием (r) от Солнца: своего максимального значения v_q скорость достигает в перигелии (при $r = q$), а минимального значения v_Q — в афелии (при $r = Q$).

Оба закона Кеплера решают задачу движения каждой планеты в отдельности. Совершенно естественно, у Кеплера возникла мысль о существовании закономерности, связывающей все планеты в единую стройную планетную систему. Лишь в 1618 г. Кеплер нашел и опубликовал в книге «Гармонии мира» (1619) эту закономерность, известную теперь под названием третьего закона Кеплера: квадраты сидерических периодов обращения планет прямо пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца.

Обозначим через T_1 сидерический период обращения одной планеты, а через a_1 — ее среднее гелиоцентрическое расстояние (большую полуось орбиты планеты). Такие же величины для другой планеты обозначим через T_2 и a_2. Тогда третий закон Кеплера запишется так:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \qquad (3.5)$$

или

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{T_3^2}{a_3^3} = \ldots = \frac{T^2}{a^3} = C, \qquad (3.6)$$

т. е. отношение квадрата сидерического периода обращения планеты к кубу ее среднего расстояния от Солнца является постоянной величиной для всей Солнечной системы.

Если выражать T в периодах обращения Земли вокруг Солнца (в звездных годах) и a — в астрономических единицах (а. е.), то для Земли $T = 1$ зв. году и $a = 1$ а. е., откуда $C = 1$, и тогда третий закон Кеплера примет самый простой вид

$$T^2 = a^3, \qquad (3.7)$$

[1] От латинского *sideralis* — звездный (*sidus* — звезда).

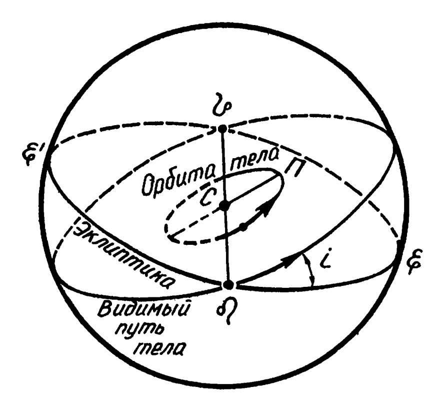


Рис. 44. Линия узлов (☊☋) и наклонение орбиты (i).

позволяющий по известным из наблюдений периодам обращения (в звездных годах) небесных тел вокруг Солнца вычислить их средние расстояния от него (в а.е.).

Хотя законы Кеплера в силу исторической традиции до сих пор формулируются как законы движения планет, в действительности они применимы к движению любых тел вокруг Солнца, а также к движению естественных и искусственных спутников планет.

Кеплер хорошо понимал, что открытые им закономерности в движении планет являются следствием какого-то более общего закона. Но открыть этого закона он не сумел, так как еще не созрели необходимые условия, не были известны основные законы механики, значительно позже сформулированные И. Ньютоном и опубликованные им лишь в 1687 г.

При изучении движения небесных тел вокруг Солнца за основную плоскость принимается плоскость земной орбиты (плоскость эклиптики). Прямая линия, по которой плоскость орбиты тела пересекается с плоскостью эклиптики (рис. 44), называется линией узлов орбиты (☊☋), а точки ее пересечения с эклиптикой — узлами орбиты[1]: в них видимый путь тела на небе пересекается с эклиптикой. В восходящем узле (☊) тело переходит к северу от эклиптики, а в нисходящем узле (☋) — к югу от нее. Угол между плоскостью орбиты тела и плоскостью эклиптики называется наклонением орбиты (i). Наклонение равно углу, под которым видимый путь небесного тела на небе пересекается с эклиптикой.

КОНФИГУРАЦИИ И УСЛОВИЯ ВИДИМОСТИ ПЛАНЕТ

Условия видимости планет зависят от их расположений на небе относительно Солнца, называемых конфигурациями, которые различны у нижних и верхних планет.

Нижние планеты, Меркурий и Венера, расположены к Солнцу ближе Земли и поэтому обращаются вокруг него с большей скоростью и с меньшим сидерическим периодом, нежели Земля. Конфигурация, при которой планета проходит между Солнцем и Землей, называется нижним соединением (с Солнцем), так как планета находится в направлении на Солнце и как бы соединяется с ним на небе (рис. 45, положение *1*). Из-за наклонения орбит обе планеты в нижнем соединении проходят выше или ниже солнечного диска. Но если эта конфигурация наступает вблизи узлов орбиты, то планета проецируется на Солнце в виде черного кружка, различимого лишь в телескопы. Такие прохождения нижних планет по диску Солнца случаются очень редко: у Меркурия — только в мае и нояб-

[1] Узлами орбиты можно также считать точки ее пересечения с плоскостью земной орбиты (с плоскостью эклиптики).

ре, через 33 года, затем через 13 и 7 лет (последнее было 10 ноября 1973 г. а очередные произойдут 13 ноября 1986 г. и 6 ноября 1993 г.); у Венеры — в июне и декабре, с чередованием через 8 лет, 105,5 года, снова 8 лет и 121,5 года (последнее было 6 декабря 1882 г., а очередные наступят 8 июня 2004 г и 6 июня 2012 г.).

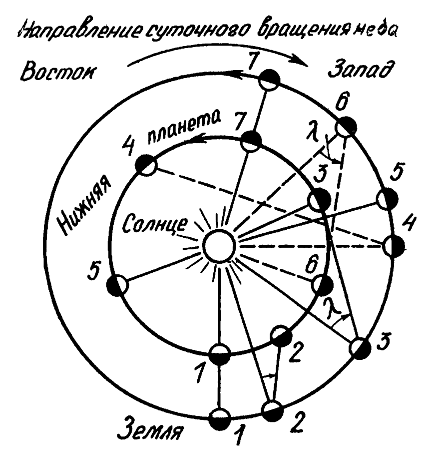


Рис. 45. Конфигурации нижней планеты.

Вблизи нижнего соединения планета не видна, так как находится над горизонтом днем, недалеко от Солнца. К Земле обращено темное полушарие планеты и в хороший телескоп виден только чрезвычайно узкий серп от освещенного Солнцем полушария (серповидная фаза; см. рис. 40). Через несколько дней планета, движущаяся быстрее Земли, отойдет к западу (вправо) от Солнца (положение *2*, рис. 45) и будет заходить за горизонт раньше Солнца, но зато восходить до его восхода. Таким образом, при западном удалении (при западной элонгации[1]) нижние планеты видны в восточной области неба в предутреннее время и часто на фоне утренней зари. Серповидная фаза планеты обращена выпуклостью к востоку, к Солнцу, и видна даже в небольшие телескопы.

С увеличением западного удаления планеты возрастают ее фаза, продолжительность предутренней видимости и геоцентрическое расстояние (т е. расстояние от Земли), а угловые размеры уменьшаются. Постепенно западное удаление достигает наибольшего значения λ (положение *3*, рис. 45), при котором прямая, соединяющая Землю с планетой, становится касательной к орбите планеты: такая конфигурация называется наибольшей западной элонгацией (или наибольшим западным удалением). В это время видна половина диска планеты (фаза = = 0,5), а предутренняя видимость, как правило (но не всегда), достигает максимальной продолжительности.

После наибольшей западной элонгации планета приближается к Солнцу с запада (положечие *4*, рис. 45), ее элонгация уменьшается, фаза растет, геоцентрическое расстояние увеличивается, а продолжительность утренней видимости сокращается. Наконец, вблизи конфигурации, называемой верхним соединением с Солнцем (положение *5*, рис. 45), планета снова становится невидимой невооруженному глазу. Во время верхнего соединения планета находится за Солнцем, ее геоцентрическое расстояние наибольшее, видимый диаметр наименьший, а фаза равна 1, так как к Земле обращено все ее полушарие, освещенное Солнцем. Затем планета отходит к востоку от Солнца (влево от него) — начинается ее восточная элонгация, при которой планета заходит за горизонт после захода Солнца, и поэтому видна в западной области неба по вечерам, часто на фоне зари.

[1] Элонгацией называется видимое удаление планеты от Солнца; происходит от латинских слов *ex* — из и *longus* — длинный.

Восточное удаление планеты увеличивается до конфигурации, называемой наибольшей восточной элонгацией (положение *6*, рис. 45), при которой прямая, соединяющая планету с Землей, опять становится касательной к планетной орбите. При наибольшей восточной элонгации фаза планеты снова равна 0,5 (выпуклость — к западу, к Солнцу), и наступают, как правило, наиболее благоприятные условия ее вечерней видимости. На протяжении всего периода вечерней видимости геоцентрическое расстояние и фаза планеты уменьшаются. а угловой диаметр возрастает

Наибольшие элонгации у Меркурия бывают от 18 до 28° (среднее значение $\lambda = 22°,8 \approx 23°$), а у Венеры — от 45 до 48° (среднее значение $\lambda = 46°,3 \approx 46°$). Поэтому продолжительность предутренней и вечерней видимости Меркурия не превышает полутора часов, а Венеры — четырех часов.

После наибольшей восточной элонгации планета снова сближается с Солнцем, ее фаза становится серповидной, продолжительность вечерней видимости сокращается и, наконец, наступает очередное нижнее соединение (положение *7*, рис. 45), при котором геоцентрическое расстояние планеты наименьшее.

Таким образом, Меркурий и Венера не могут быть видны на протяжении ночи, а видны либо в предутреннее время, либо по вечерам.

Из-за различной скорости движения Земли и планеты ее одноименные конфигурации (например, нижние соединения; положения *1* и *7*, рис. 45) наступают в разных точках их орбит, подобно тому как минутная и часовая стрелки часов встречаются у разных делений циферблата. Промежуток времени между двумя последовательными одноименными конфигурациями (период смены конфигураций) называется синодическим[1] периодом обращения и отличается от звездного (сидерического) периода.

Обозначим сидерический период обращения нижней планеты через T, ее синодический период обращения — через S, а звездный период обращения Земли (звездный год) —T_0. Тогда средняя угловая скорость (называемая в астрономии средним движением) будет у планеты

$$\omega = \frac{360°}{T},$$

а у Земли

$$\omega_0 = \frac{360°}{T_0}.$$

За синодический период обращения S планеты (рис. 46) Земля пройдет угловой путь

$$L_0 = \omega_0 S = \frac{360°}{T_0} S, \qquad (3.8)$$

а планета, уйдя вперед, сделает один оборот вокруг Солнца и затем нагонит Землю, т е. пройдет угловой путь

$$L = 360° + L_0 = \omega S = \frac{360°}{T} S. \qquad (3.9)$$

[1] От греческого «синодос» — соединение.

Из формул (3.8) и (3.9) следует, что

$$L - L_0 = 360° = \frac{360°}{T}S - \frac{360°}{T_0}S,$$

откуда

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \qquad (3.10)$$

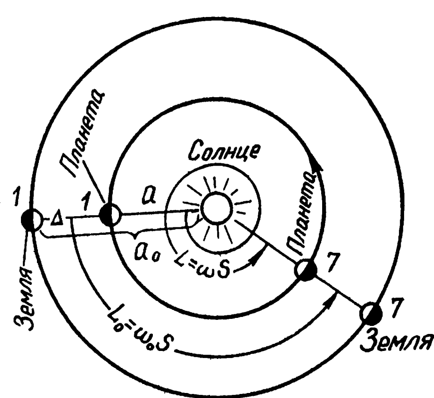


Рис. 46. Синодическое обращение нижней планеты (последовательные нижние соединения).

Выражение (3.10) часто называют уравнением синодического движения. При вычислении синодического периода обращения S по сидерическому периоду T (или наоборот) проще всего выражать их в звездных годах, полагая $T_0 = 1$ году, а полученный результат при необходимости переводить в средние сутки из расчета, что $T_0 = 1$ звездный год = 365,26 суток.

Желающих убедиться в справедливости формулы (3.10) может постичь разочарование. Подставив в нее значения T Меркурия и Венеры (см. таблицу 2 на с. 155), найдем для Меркурия $S = 116^д$, а для Венеры $S = 584^д$. Однако в действительности одноименные конфигурации Меркурия наступают через промежутки времени от 104 до 132 суток, а Венеры — от 576 до 591 суток. Расхождение вызвано тем, что формула (3.10) выведена из условия постоянной средней угловой скорости (ω), в то время как планеты движутся по эллиптическим орбитам с переменной скоростью. Следовательно, эта формула позволяет вычислить лишь среднее, а точнее — наиболее частое значение синодического периода обращения.

Условия видимости нижних планет зависят не только от их конфигураций. Так, если склонение планеты меньше склонения Солнца, то даже в эпохи наибольших элонгаций планета восходит и заходит в светлое время суток. Особенно это относится к Меркурию, который из-за близости к Солнцу доступен наблюдениям в общей сложности не более одной трети года.

Наилучшие условия вечерней видимости нижних планет создаются весной, когда эклиптика по вечерам высоко поднимается над горизонтом. Аналогичные условия предутренней видимости складываются осенью[1].

Верхние планеты отстоят от Солнца дальше Земли и движутся медленнее ее ($\omega < \omega_0$). В конфигурации, называемой соединением[2], планета находится за Солнцем и из-за наклонения ее орбиты расположена на небе несколько выше или ниже солнечного диска (рис. 47, положение *1*). Если же соединение произойдет вблизи узла орбиты, то планета пройдет за диском Солнца. Вблизи соединения планета располагается на небе недалеко от Солнца, восходит и заходит почти одновременно с ним и поэтому не видна. Ее геоцентрическое расстояние наибольшее, а диаметр диска наименьший.

---

[1] Совместные действия всех причин приводят к тому, что одинаковые условия видимости Меркурия повторяются через 13 лет, а Венеры — через 8 лет.

[2] У верхних планет нижнего соединения не бывает, и поэтому единственное соединение не имеет смысла называть верхним.

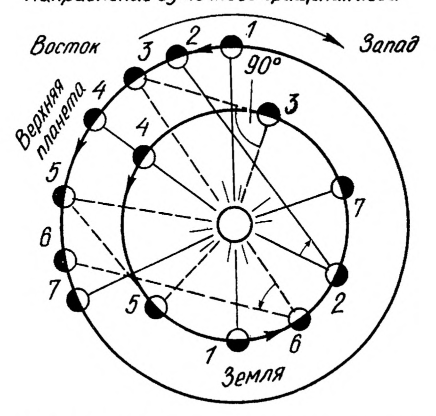


Рис. 47 Конфигурации верхней планеты.

Из-за движения Земли Солнце смещается по эклиптике к востоку быстрее планеты, которая, перемещаясь в том же направлении, но с меньшей угловой скоростью, отстает от Солнца к западу (положение *2*, рис. 47) и через несколько дней становится видимой в восточной области неба на фоне утренней зари, незадолго до восхода Солнца. По мере возрастания западного удаления планета с каждым днем восходит раньше, чем накануне, и условия ее видимости заметно улучшаются: она дольше видна над горизонтом, ее геоцентрическое расстояние уменьшается, а угловой диаметр и блеск возрастают Когда западное удаление достигнет 90°, наступает конфигурация, называемая западной квадратурой (положение *3*, рис. 47), при которой планета восходит около полуночи и видна до рассвета. Постепенно, отставая от Солнца, планета оказывается в противоположной стороне неба — наступает эпоха противостояния планеты. При конфигурации, называемой противостоянием, или оппозицией[1], планета отстоит от Солнца на 180° (положение *4*, рис. 47).

Эпоха противостояния — самая благоприятная для наблюдений планеты: она восходит вечером и заходит утром, т. е. видна всю ночь, максимально сближается с Землей, имеет значительный блеск и наибольший угловой диаметр. В эту эпоху Земля обгоняет планету, и с Земли кажется, что планета некоторое время перемещается попятным движением, с востока к западу. На рисунке 48 одинаковыми цифрами отмечены положения Земли и планеты на орбитах в определенные моменты времени, а также соответствующие им видимые положения планеты на фоне звездного неба. Прямое движение планеты ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) при обгоне ее Землей сменяется попятным ($3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$), после чего прямое движение восстанавливается ($5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$). В момент противостояния планета находится в середине дуги попятного движения (положение *4*, рис. 48). Из-за наклонения орбиты планеты ее видимый путь выглядит петлеобразным. Таким образом, петлеобразные движения верхних планет не реальные, а кажущиеся (параллактические).

После оппозиции планета постепенно сближается с Солнцем (которое приближается к ней с западной стороны), располагается на небе слева (к востоку) от него и видна по вечерам после его захода. Условия видимости планеты ухудшаются, с каждым днем она раньше заходит за горизонт, ее геоцентрическое расстояние возрастает, а блеск и видимые размеры уменьшаются. Когда восточное удаление планеты от Солнца сократится до 90°, наступает конфигурация восточная квадратура (положение *5*, рис. 47), при которой планета после захода Солнца видна в южной области неба и заходит вблизи полуночи. Нако-

[1] От латинского *opposition* — противоположение.

нец, Солнце подходит к планете так близко (положение *6*, рис. 47), что она становится видимой уже на фоне вечерней зари, а затем скрывается в солнечных лучах — наступает ее очередное соединение с Солнцем (положение *7*, рис. 47).

У верхних планет, так же как и у нижних, синодический период обращения S не равен сидерическому периоду T. Повторив рассуждения о связи S и T (см. с. 74, 75), найдем уравнение синодического движения верхней планеты:

$$\frac{1}{S}=\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T},$$

так как звездный год $T_0 < T$, а среднее суточное движение Земли $\omega_0 > \omega$ планеты. Эта формула также дает среднее значение синодического периода обращения, от которого имеются отклонения в обе стороны. Так, у близкого к Земле Марса, движущегося по довольно вытянутой орбите, средний синодический период обращения равен 780 суткам при изменениях от 765 до 811 суток; у Юпитера $S = 399$ суток с колебаниями от $395^{д}$ до $403^{д}$, а у далекого Сатурна отклонения от среднего $S = 378$ суток составляют всего лишь $2^{д}$.

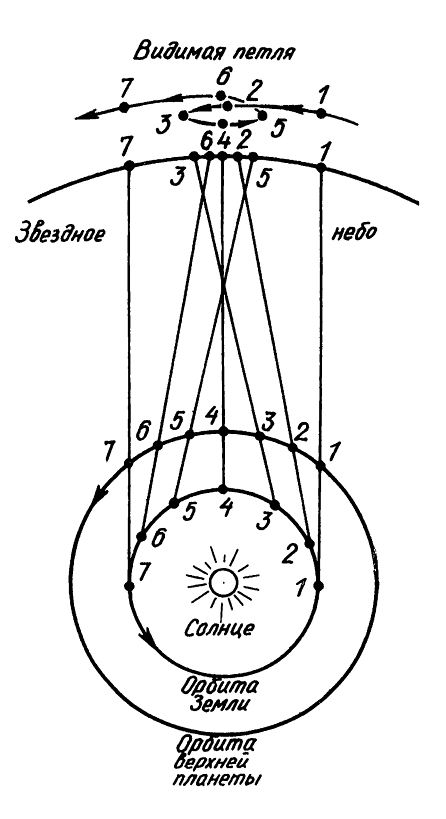


Рис. 48. Объяснение петлеобразного пути верхних планет.

Условия видимости верхних планет зависят от их расположения в зодиакальных созвездиях. Даже в эпохи противостояний эти условия резко различны: наилучшие наступают в зимние месяцы, когда планеты перемещаются по созвездиям Тельца и Близнецов, высоко поднимаются и бóльшую часть суток видны над горизонтом, чему способствуют длинные зимние ночи. Летние противостояния — самые неблагоприятные, так как наступают в созвездиях Скорпиона и Стрельца, суточный путь которых над горизонтом сравнительно низок, а короткие летние ночи сокращают и без того небольшую продолжительность видимости планет. Конечно, в южных местностях, где летние зодиакальные созвездия высоко поднимаются над горизонтом, условия видимости планет значительно улучшаются[1].

Для наглядного представления конфигураций планет полезно начертить в одинаковом масштабе их орбиты в виде концентрических окружностей, центр которых представит Солнце, и из него провести луч, изображающий направ-

[1] Одинаковые условия видимости Марса наступают через 47 лет, Юпитера — через 12 лет и Сатурна — через 29 лет.

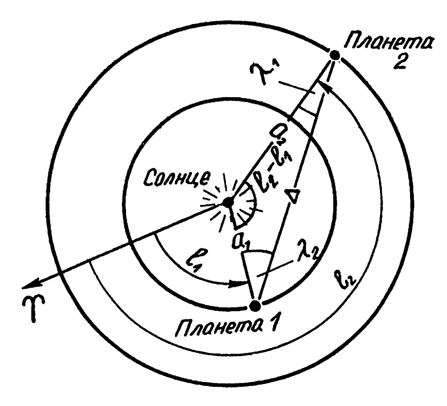


Рис. 49. Гелиоцентрическая долгота планет.

ление на точку весеннего равноденствия ♈ (рис. 49). Угол при Солнце, отсчитываемый от этого направления против часовой стрелки в сторону планеты, называется гелиоцентрической долготой l. По гелиоцентрической долготе планет можно указать их расположение на орбитах и их конфигурации.

Описание условий видимости планет и значения их гелиоцентрической долготы в разные дни года публикуются в астрономических ежегодниках, в том числе в «Школьном астрономическом календаре».

Все выводы о конфигурациях и условиях видимости планет вполне применимы к Земле, наблюдаемой с другой планеты. Для Меркурия и Венеры Земля является верхней планетой, а для всех остальных — нижней. Синодический период обращения Земли в этом случае равен такому же периоду планеты по наблюдениям с Земли.

ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЫ ОРБИТ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИЕ РАССТОЯНИЯ ПЛАНЕТ[1]

Эксцентриситеты планетных орбит определяют из наблюдений. Но как же найти эксцентриситет орбиты Земли, движения которой мы непосредственно не наблюдаем? Здесь приходит на помощь второй закон Кеплера, представляющий собой частный случай более общего физического закона сохранения момента количества движения (момента импульса)[2].

Обозначим линейную скорость планеты в перигелии через v_q, а в афелии — через v_Q, перигельное расстояние — q и афелийное расстояние — Q (см. рис. 43). Тогда, согласно упомянутому закону,

$$v_q q = v_Q Q. \qquad (3.11)$$

Выразив линейные скорости v_q и v_Q через угловые ω_q и ω_Q, найдем $v_q = \omega_q q$ и $v_Q = \omega_Q Q$ и, подставив их в равенство (3.11), получим:

$$\omega_q q^2 = \omega_Q Q^2,$$

а так как[3] $Q = a(1 + e)$ и $q = a(1 - e)$, то $\frac{Q}{q} = \frac{1+e}{1-e}$, или

$$\frac{1+e}{1-e} = \sqrt{\frac{\omega_q}{\omega_Q}}. \qquad (3.12)$$

[1] Напомним, что геоцентрическим расстоянием называется расстояние от Земли.
[2] Исторически этот закон был найден позже законов Кеплера.
[3] См. формулы (3.1) и (3.2).

Чтобы применить формулу (3.12) к движению Земли, нужно найти ω_q и ω_Q из измерений ежесуточного перемещения Солнца по эклиптике. Быстрее всего Солнце перемещается в начале января, по 61′ в сутки, а медленнее всего в начале июля, по 57′ в сутки. Следовательно, с такой же угловой скоростью движется и Земля по орбите в эти дни, проходя перигелий в самом начале января, а афелий — в самом начале июля. Подставляя в формулу (3.12) $\omega_q = 61'$ и $\omega_Q = 57'$, найдем эксцентриситет земной орбиты $e = 0{,}0167$ (округленно $e = 0{,}017$).

Эллиптичность орбит сказывается на геоцентрических расстояниях планет даже при одинаковых их конфигурациях, а следовательно, и на их блеске. У далеких планет относительное изменение геоцентрического расстояния не слишком велико. Так, у Юпитера ($a = 5{,}203$ а.е. и $e = 0{,}048$) оно колеблется от 3,95 а.е. = 591 млн. км (в противостоянии) до 6,45 а.е. = 965 млн. км (в соединении), в связи с чем видимый диаметр планеты изменяется от 50 до 30″, а блеск— от —2,^{m}5 до —1,^{m}2, т. е. примерно в три раза.

Для близкого Марса ($a = 1{,}524$ а. е.), к тому же обращающегося по значительно вытянутой орбите ($e = 0{,}093$), различия весьма существенны. В соединении Марс может удалиться от Земли почти на 400 млн. км (2,666 а. е.), и тогда его видимый диаметр близок к 3″(как у дробинки диаметром 3 мм, рассматриваемой невооруженным глазом с расстояния в 210 м), а блеск — около +2,^{m}2 (примерно как у главных звезд созвездия Андромеды), и даже не всякий астроном сразу заметит его на небе. Зато в противостоянии Марс может подойти к Земле на расстояние от 0,669 а. е. = 100 млн. км до 0,370 а. е. = 55,3 млн. км. Оппозиции Марса при геоцентрическом расстоянии, не превышающем 0,401 а. е. = 60 млн. км, называют великими противостояниями. В это время диаметр диска планеты увеличивается до 25″, а блеск до —2,^{m}6 (больше, чем у Юпитера), и своим ярким красноватым цветом Марс привлекает внимание даже лиц, далеких от астрономии.

На рисунке 50 показаны геоцентрические расстояния Марса при его оппозициях в разные годы, а также месяцы, обозначенные римскими цифрами, на протяжении которых Земля проходит участки своей орбиты. Жирной линией отмечены те участки обеих орбит, на которых возможны великие противостояния.

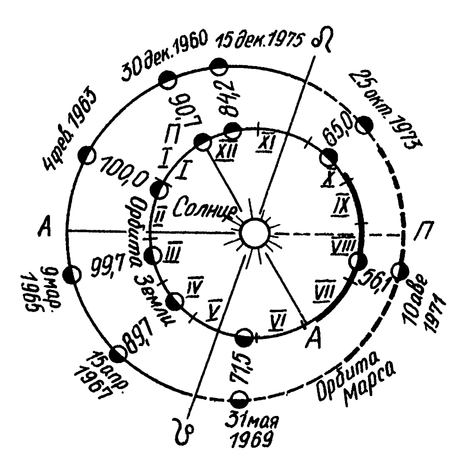


Рис. 50. Обычные и великие противостояния Марса. Пунктиром показана часть орбиты, расположенная под плоскостью эклиптики. Числа между изображениями Земли и Марса показывают расстояния (в млн. км). *А* — афелии и *П* — перигелии орбит.

Легко подсчитать интервалы времени, через которые такие противостояния повторяются. Марс проходит перигелий через каждые $T = 687^д$ = = 1,881 года (сидерический период обращения), а его противостояния чередуются в среднем через $S = 780^д$= = 2,136 года (синодический период обращения). Следовательно, искомые интервалы времени должны содержать целое число n периодов T и целое

число m периодов S, т. е. $nT = mS$, или $1{,}881\, n = 2{,}136\, m$. Такими парами чисел являются $n = 8$, $m = 7$ и $n = 9$, $m = 8$. Первые в произведениях дают $1{,}881 \times \times 8 = 15{,}05$ года и $2{,}136 \cdot 7 = 14{,}95$ года, а вторые соответственно 16,93 года и 17,09 года. Поэтому великие противостояния Марса недалеко от перигелия повторяются дважды через 15 лет и затем через 17 лет[1], но, конечно, в разных точках близкого к Земле участка своей орбиты, и происходят в интервале с 5 июля по 5 октября. Наиболее часто они наступают в августе и сентябре. Последние были 10 сентября 1956 г и 10 августа 1971 г., а очередное произойдет в конце июля 1986 г

У Меркурия ежегодно происходят три нижних и три верхних соединения на различных геоцентрических расстояниях, вследствие чего диаметр диска планеты меняется, как правило, от 5 до 12″, блеск — от $+2{,}^m0$ до $-1{,}^m3$, но иногда увеличивается до $-1{,}^m5$ и сравним с блеском Сириуса (α Большого Пса), а снижается до $+3{,}^m0$, и тогда на сумеречном небе планета не видна.

У Венеры, самой яркой планеты в небе Земли, блеск меняется в пределах от $-3{,}^m1$ до $-4{,}^m4$. В период наибольшего блеска Венера так ярка, что в темное время суток освещаемые ею земные предметы отбрасывают тени, а иногда она бывает видна невооруженным глазом даже днем.

Видимый диаметр планеты вблизи верхнего соединения около 10″, а вблизи нижнего доходит до 63″ и сравним с дробинкой диаметром 3 мм, но рассматриваемой уже с расстояния 10 м. В этот период времени Венера выглядит узким серпом, хорошо видимым даже в небольшой телескоп. Невооруженным глазом фаза не видна, так как разрешающая способность нормального зрения близка к 2′

РАЗМЕРЫ И ФОРМА ЗЕМЛИ

Принцип определения радиуса Земли весьма прост. Представим себе два пункта *1* и *2* земной поверхности, расположенные на одном географическом меридиане и имеющие географическую широту φ_1 и φ_2 (рис. 51). Если между этими пунктами измерить линейное расстояние l (например, в километрах), то легко найти длину l_0 дуги меридиана, стягивающей угол в 1°:

$$l_0 = \frac{l}{\varphi_2 - \varphi_1}$$

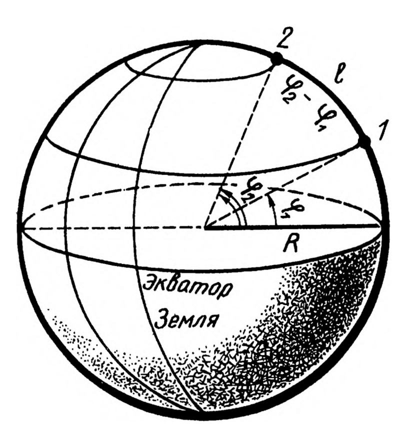


Рис. 51. Принцип градусных измерений.

Такой способ определения длины единичной дуги (т. е. дуги в 1°), называемый градусным измерением, позволяет найти длину географического меридиана (т. е. полуокружность, от одного географического полюса до другого)

$$L = 180° l_0 = \pi R_\lambda$$

и вычислить его радиус

$$R_\lambda = \frac{180^0 l_0}{\pi} = \frac{180^0 l}{\pi(\varphi_2 - \varphi_1)}. \qquad (3.13)$$

[1] В редких случаях это чередование нарушается, и тогда после одного 15-летнего периода следует один 17-летний.

Если градусные измерения различных участков географического меридиана дадут одинаковые значения l_0, то меридиан имеет форму полуокружности с одинаковым радиусом кривизны R_λ и тогда Землю можно считать шаром радиуса $R = R_\lambda$. При различных значениях l_0 форма географического меридиана отличается от полуокружности, а фигура Земли — от сферы.

В 1615 г. голландский физик Виллеброрд Снелль (1580—1626), более известный под фамилией Снеллиуса, предложил метод градусных измерений, названный триангуляцией[1]

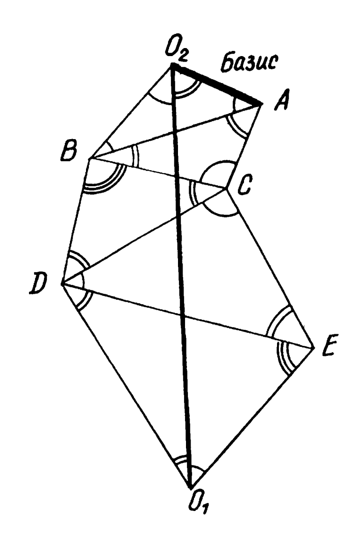


Рис. 52. Триангуляция.

Сущность триангуляции состоит в том, что в концевых точках O_1 и O_2 дуги, длину которой необходимо определить (рис. 52), и по обе стороны от нее (точки A, B, C, D, E) устанавливают специальные вышки — геодезические[2] сигналы (рис. 53). Эти сигналы служат вершинами образованной на местности сети треугольников, называемой триангуляционной сетью. Геодезические сигналы расставляют с таким расчетом, чтобы с наблюдательной площадки каждого сигнала были видны такие же площадки соседних вышек. С этих площадок угломерными инструментами измеряют углы между направлениями на соседние вышки, а с концевых вышек (O_1 и O_2, см. рис. 52) — еще углы между географическим меридианом и направлениями на ближайшие сигналы, т. е. их азимуты. Сторону AO_2 треугольника, примыкающую к одной из концевых точек триангуляционной сети, обязательно располагают на ровной местности и непосредственно измеряют в линейных мерах. Эта сторона служит основанием для последующих вычислений и поэтому называется базисом[3] триангуляционной сети. Измеренные углы в треугольниках и длина базиса позволяют по формулам тригонометрии вычислить длину сторон треугольников и длину искомой дуги O_1O_2. Таким образом, триангуляция дает возможность с большой точностью определять расстояния между удаленными пунктами, даже если они разделены сильно пересеченной местностью,

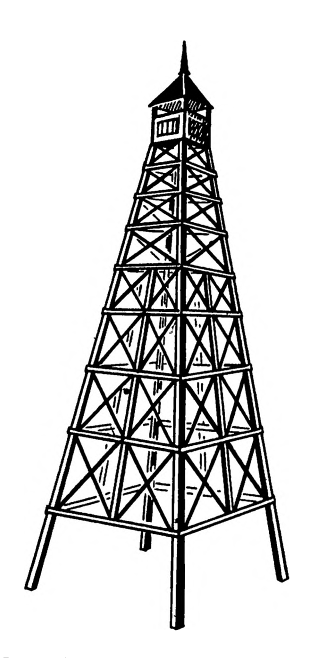


Рис. 53. Геодезический сигнал.

---

[1] От латинского *triangulum* — треугольник.

[2] Геодезия — наука, занимающаяся измерениями на местности и изучающая форму и размеры Земли. Название происходит от греческих слов «Гея» — Земля и «дазомаи» — разделяю, делю на части.

[3] По-гречески «базис» — основание.

непосредственные измерения на которой невозможны.

Для выполнения градусных измерений вдоль географического меридиана на нем выбирают несколько участков, в концевых точках которых астрономическими методами (см. с. 41 и 29) измеряют географические координаты — долготу λ и широту φ. Географическая долгота этих точек должна быть одинаковой. Определив триангуляцией длину l каждого участка, вычисляют по формуле (3.13) его радиус кривизны R_λ.

Впервые метод триангуляции был применен самим Снеллем в 1617 г. и впоследствии постепенно совершенствовался. Большие градусные измерения были выполнены с 1816 по 1855 г. в России: под руководством известного астронома В. Я. Струве (1793—1864) была промерена дуга меридиана длиной 2800 км от устья Дуная ($\varphi = 45°20'$) до Северного Ледовитого океана ($\varphi = 70°40'$).

В первой половине XX в. во многих странах, в том числе в СССР, стали создавать густые триангуляционные сети для построения географических и топографических карт, необходимых в решении народнохозяйственных задач.

Многочисленными градусными измерениями установлено, что Земля имеет форму, близкую к двуосному эллипсоиду, т. е. к математической фигуре, образованной вращением эллипса вокруг малой оси. Но так как различие в полярном и экваториальном диаметрах Земли небольшое, то земной эллипсоид можно называть сфероидом, т. е. фигурой, очень мало отличающейся от шара.

По измерениям с применением свето- и радиолокаторов, а также геодезических искусственных спутников Земли, выполненным в 1960—1970 гг. в СССР, США и других странах, найдены следующие значения элементов земного сфероида:

экваториальный радиус	$R_0 = 6378{,}140$ км,
полярный радиус	$R_п = 6356{,}755$ км,
различие в радиусах	$R_0 - R_п = 21{,}385$ км,
сжатие Земли	$\varepsilon = \frac{R_0 - R_п}{R_0} = 1/298{,}26.$

Эти величины утверждены в августе 1976 г. XVI съездом Международного астрономического союза и ныне считаются общепризнанными.

В астрономии достаточно принимать $R_0 = 6378$ км, $R_п = 6357$ км, сжатие $\varepsilon = {}^1/_{298} \approx {}^1/_{300}$ и среднее значение $l_0 = 111{,}2$ км.

Различие в 21 км между экваториальным и полярным радиусами Земли незначительно в сравнении с ее размерами. Если бы мы изготовили земной глобус с экваториальным диаметром в 2 м, то его полярный диаметр отличался бы от экваториального менее чем на 7 мм. Поэтому во многих задачах астрономии Землю принимают за шар, радиус R которого определяется по действительному объему Земли и называется ее средним радиусом. Из стереометрии известно, что объем эллипсоида

$$V_э = \frac{4}{3}\pi R_0^2 R_п,$$

а объем равновеликого ему шара

$$V_ш = \frac{4}{3}\pi R^3,$$

откуда средний радиус Земли

$$R = \sqrt[3]{R_0^2 R_п} = \sqrt[3]{6378 \cdot 6357}, \text{ или } R = 6371 \text{ км.} \qquad (3.14)$$

За последние десятилетия быстро развивается спутниковая триангуляция, позволяющая по измерениям небесных координат и радиолокации (светолокации) искусственных спутников Земли изучать движение земных материков, а также фигуру Земли. Однако эти задачи являются геодезическими, а не астрономическими, и поэтому здесь не рассматриваются.

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ И РАЗМЕРОВ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Классическим способом определения геоцентрических расстояний (т. е. расстояний от Земли) является тригонометрический способ, принцип которого сводится к измерению угла между направлениями на небесное тело из разных точек земной поверхности. Представим себе (рис. 54), что одновременно наблюдатель O (для которого OZ есть направление на зенит Z) видит небесное тело S на истинном горизонте, а наблюдатель D видит его в своем зените (это равносильно наблюдению из центра Земли C). Угол $SOC = 90°$. Географические координаты (λ и φ) обоих наблюдателей известны, и по ним легко вычислить угол $\angle OCD$[1], а следовательно, и угол $p = 90° - \angle OCD$, который называется горизонтальным параллаксом небесного тела и представляет собой наибольший угол, под которым с этого тела виден радиус Земли (R) в месте наблюдения. Тогда геоцентрическое расстояние небесного тела

$$\Delta = SC = \frac{R}{\sin p}.$$

Однако этот принцип не может быть непосредственно применен на практике и служит лишь схемой, по которой проводятся вычисления расстояний, так как из-за атмосферной рефракции небесное тело, видимое на горизонте, в действительности находится под ним[2].

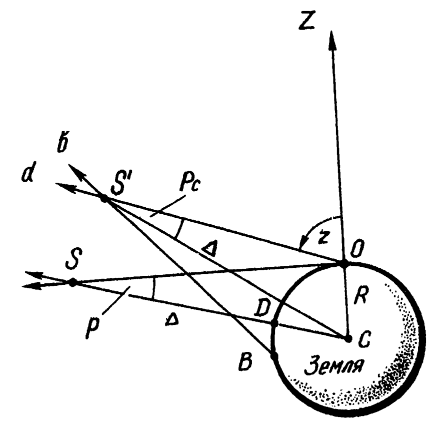


Рис. 54. Суточный и горизонтальный параллаксы.

[1] В частности, если оба наблюдателя находятся на одном географическом меридиане, то

$$\angle OCD = \varphi_O - \varphi_D$$

[2] Многие видели, что при восходе и заходе Солнца и Луны их круглые диски принимают эллиптическую форму: вертикальный диаметр диска явно меньше горизонтального. В этом повинна рефракция: так как у самой поверхности Земли плотность воздуха наибольшая, то световой луч, идущий от нижнего края светила, преломляется в земной атмосфере сильнее луча, идущего от верхнего края, и поэтому вертикальный диаметр светила кажется укороченным.

Поэтому во избежание ошибок при измерении параллакса наблюдения небесного тела проводят из пунктов O и B (см. рис. 54) при сравнительно высоком его положении (S') над горизонтом. Наблюдатель O видит небесное тело на фоне звезд d, а наблюдатель B — на фоне звезд b и, следовательно, измеренные экваториальные координаты тела будут несколько различными. Это различие дает возможность вычислить угол $p_c = \angle CS'O$, называемый суточным параллаксом, и по нему найти горизонтальный экваториальный параллакс p_0, т. е. наибольший угол, под которым с небесного тела виден экваториальный радиус Земли $R_0 = 6378$ км, принимаемый за базис измерений.

Именно эти горизонтальные экваториальные параллаксы тел Солнечной системы, часто для краткости называемые параллаксами (без прилагательных), приводятся в астрономических календарях и справочниках. Тогда геоцентрическое расстояние

$$\Delta = \frac{R_0}{\sin p_0}. \qquad (3.15)$$

Параллаксы небесных тел очень малы и измеряются минутами (p_0') и секундами (p_0'') дуги, и поэтому в формуле (3.15) можно заменить $\sin p_0$ самим углом p_0, выраженным в радианах (p_r), а так как 1 радиан = 3438′ = 206 265″, то

$$\Delta = \frac{3438'}{p_0'} R_0 = \frac{206\,265''}{p_0''} R_0.$$

Геоцентрические расстояния могут быть выражены как в километрах (если принять $R_0 = 6378$ км), так и в экваториальных радиусах Земли, положив $R_0 = 1$.

Тригонометрический способ измерения параллакса Солнца и вычисление по нему расстояния (длины астрономической единицы a_0) дают низкую точность. Поэтому были предложены другие способы определения длины астрономической единицы.

Быстрое развитие радиотехники в 40-е и последующие годы нашего столетия привело к созданию радарного, или радиолокационного, метода измерения расстояний до небесных тел. Принцип этого метода состоит в том, что к небесному телу посылают радиосигналы в виде коротких импульсов, длительностью в десятые и сотые доли секунды, и фиксируют моменты их посылки (t_1) и возвращения (t_2). Тогда искомое расстояние

$$\Delta = c\frac{t_2 - t_1}{2}, \qquad (3.16)$$

где ($t_2 - t_1$) выражается в секундах, а $c = 299\,792$ км/с — скорость распространения радиоволн в вакууме.

Однако определить длину астрономической единицы радиолокацией самого Солнца невозможно, хотя бы по той причине, что Солнце — газообразное тело, находящееся в плазменном состоянии, и направленные к нему радиоволны будут отражаться от его ионизованных внешних слоев, расположенных на различной и неизвестной глубине, в то время как требуется знать расстояние до его центра, куда радиоволны не проникнут. Поэтому эта задача решается радиолокацией планет с твердой поверхностью, в первую очередь—Венеры и Меркурия.

Не вдаваясь в сложные подробности, учитывающие взаимное расположение Земли и Венеры, рассмотрим принцип такого определения. Примем, что в ниж-

нем соединении Венеры (см. рис. 46) обе планеты находятся на средних расстояниях от Солнца. Венера — на расстоянии a и Земля — на расстоянии $a_0 = 1$ а. е. Тогда расстояние между планетами

$$\Delta = a_0 - a = a_0\left(1 - \frac{a}{a_0}\right),$$

откуда искомая длина астрономической единицы

$$a_0 = \frac{\Delta}{1 - a/a_0}. \tag{3.17}$$

Расстояние Δ определяется в километрах по формуле (3.16), а отношение $a/a_0 = 0{,}72333$ известно из третьего закона Кеплера по сидерическим периодам обращения Венеры и Земли. Следовательно, формула (3.17) позволяет вычислить a_0 в километрах.

Неоднократная радиолокация Меркурия и Венеры, выполненная в СССР, США и Англии в 70-е годы нашего столетия, установила, что длина астрономической единицы $a_0 = 149\,597\,870$ км с ошибкой, не превышающей 100 км. Этому значению астрономической единицы соответствует солнечный параллакс

$$p_\odot = 8'',794.$$

Для решения многих астрономических задач достаточно принимать $a_0 = 149\,600\,000$ км.

Когда найдены геоцентрические расстояния Δ и измерены угловые размеры ρ небесных тел, то нетрудно вычислить их линейные размеры (например, радиусы):

$$R = \Delta \sin \rho.$$

Так как, согласно формуле (3.15), $\Delta = \dfrac{R_0}{\sin p_0}$,

а p_0 и ρ малы (даже у Луны и Солнца ρ близко к 16′), то $R = R_0 \dfrac{\rho}{p_0}$,

причем ρ и p_0 должны быть обязательно выражены в одинаковых единицах измерения, а R получается либо в километрах (при $R_0 = 6378$ км), либо в экваториальных радиусах Земли (если принять $R_0 = 1$).

Линейные радиусы Солнца, Луны и планет, как правило, выражают в радиусах Земли. В частности, при среднем расстоянии Земли от Солнца его угловой радиус $\rho_\odot = 15'59'',4 = 959'',4$ и потому линейный радиус Солнца

$$R = R_0 \frac{\rho_\odot}{p_\odot}, \quad R = \frac{959'',4}{8'',794} R_0 = 109{,}1 R_0, \text{ или } R = 696\,000 \text{ км}.$$

Теперь предложим читателям самим вычислить линейные радиусы Марса, Венеры и Луны. Во время великого противостояния Марса его угловой диаметр равен 25″, а экваториальный горизонтальный параллакс $p_0 = 23'',5$. Когда Венера бывает в нижнем соединении с Солнцем на геоцентрическом расстоянии в $39{,}6 \cdot 10^6$ км, ее угловой диаметр равен 63″. Сведения же о Луне нужно самостоятельно найти в «Школьном астрономическом календаре».

Тут же предупредим читателей, что изложенные способы определения расстояний и размеров неприменимы к звездам, так как из-за колоссального удаления от Земли горизонтальные параллаксы всех звезд равны нулю.

ГЛАВА IV

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ И ЕГО СЛЕДСТВИЯ

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Закон всемирного тяготения был открыт гениальным английским ученым Исааком Ньютоном (1643—1727). Существует легенда, к сожалению иногда серьезно излагаемая, будто бы идея о силе тяготения между телами была навеяна Ньютону падением с дерева яблока. Эта легенда поведана миру французским просветителем Ф. Вольтером со слов племянницы Ньютона, которой сам Ньютон будто бы рассказал об этом. Не исключено, что Ньютон мог объяснить своей племяннице, не ведавшей науки, действие тяготения на примере падения яблока. Но это совсем не означает, что оно привело Ньютона к мысли о тяготении между телами. Великие открытия не бывают случайными, а всегда являются плодом упорного труда, в котором одаренность ученого, безусловно, играет значительную роль, но не меньшая роль принадлежит общему уровню развития науки.

Идея о тяготении между небесными телами не принадлежит Ньютону и высказывалась задолго до него. До открытия законов Кеплера мысли о тяготении между небесными телами не возникало, поскольку движение по окружности считалось свойственным самой природе. Но открытие этих законов разрушило устоявшийся взгляд на круговое движение и сразу же поставило вопрос о причине движения планет по эллиптическим орбитам.

Уже Кеплеру было ясно, что на планеты со стороны Солнца действует сила, которую он сравнивал с притяжением железа к магниту.

В 1665 г. итальянский физик Джованни Борелли (1608—1679) в книге о движении спутников Юпитера четко высказал предположение о взаимном притяжении небесных тел и о неизбежном удалении планет от Солнца при отсутствии тяготения между ними.

Над проблемой взаимного тяготения тел много работал выдающийся английский физик Роберт Гук (1635—1703), безуспешно пытавшийся опытным путем найти закон изменения силы тяготения с расстоянием.

Таким образом, в эпоху Ньютона идея тяготения между небесными телами уже охватывала умы многих ученых различных стран. Развитие науки подошло к той грани, за которой неминуемо должен был быть открыт закон всемирного тяготения если не Ньютоном, то кем-нибудь другим. Гениальность Ньютона проявилась прежде всего в том, что, зная о работах своих предшественников и современников, он применил правильный метод решения проблемы: наблюдая следствие, отыскать его причину. Следствием было движение планет по законам Кеплера, причиной — сила, физическую сущность и математическое выражение которой предстояло найти.

В 1666 г. Ньютон начал изучать проблему тяготения по движению Луны. Если, рассуждал он, земная сила тяжести удерживает тела даже на вершинах

высоких гор, то, может быть, она распространяется и до Луны, и тогда именно эта сила удерживает Луну на орбите. Чтобы проверить это предположение, необходимо было найти закон изменения силы тяжести с расстоянием, что безуспешно пытался сделать Гук. Приняв в первом приближении орбиты Луны и планет круговыми ($r = a$), Ньютон вывел формулу центростремительного ускорения[1]:

$$g = \frac{v_a^2}{r}, \tag{4.1}$$

где v_a — линейная скорость движения тела по окружности (круговая скорость) и r — радиус окружности (радиус-вектор тела).

Полагая, что аналогичная сила, исходящая от Солнца, удерживает планеты на орбитах, Ньютон выразил линейные скорости двух планет:

$$v_{a1} = \frac{2\pi r_1}{T_1} \text{ и } v_{a2} = \frac{2\pi r_2}{T_2}$$

и по ним нашел отношение центростремительных ускорений:

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{v_{a1}^2}{r_1} : \frac{v_{a2}^2}{r_2} = \frac{r_1}{r_2} : \frac{T_1^2}{T_2^2}.$$

Так как, по третьему закону Кеплера,

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{r_1^3}{r_2^3} \text{ (орбиты приняты круговыми),}$$

то

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{r_1}{r_2} : \frac{r_1^3}{r_2^3}, \text{ или } \frac{g_1}{g_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2},$$

т. е. ускорение силы тяготения (гравитационное ускорение[2]) обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому если сила тяготения между Землей и Луной тождественна земной силе тяжести, то по известному ускорению силы тяжести $g_0 = 981$ см/с^2 у земной поверхности (на расстоянии радиуса R Земли от ее центра) можно вычислить гравитационное ускорение $g_☾$ Луны на расстоянии r от Земли, так как тогда

$$g_☾ = \frac{g_0}{(r/R)^2}. \tag{4.2}$$

Но то же ускорение Луны, являясь центростремительным, может быть вычислено по формуле (4.1) как

$$g_☾ = \frac{v_a^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2},$$

и если оба результата совпадут, то отождествление силы тяжести с силой тяготения можно считать доказанным.

---

[1] Эту же формулу независимо вывел и опубликовал в 1673 г. голландский физик Христиан Гюйгенс (1623—1695).

[2] От латинского *gravitas* — тяжесть.

Во времена Ньютона были известны период обращения Луны вокруг Земли (звездный месяц) $T = 27{,}32$ суток $= 27{,}32 \cdot 86\,400$ с, радиус Земли $R = 3840$ миль (по измерениям Снелля, 1617) и расстояние до Луны $r = 60\,R$.

По формуле (4.1) Ньютон нашел[1] $g_{☾} = 0{,}23$ см/с^2, но по формуле (4.2) получилось:

$$g_{☾} = \frac{981 \text{см/с}^2}{60^2} = 0{,}27 \text{ см/с}^2,$$

т. е. расхождение в 1,17 раза.

Существует мнение, что в этом расхождении повинно неточное значение радиуса Земли. Но уже тогда 1 морская миля принималась равной длине дуги в 1′ земного меридиана, что соответствовало радиусу Земли $R = 3440$ морских миль (6371 км). Скорее всего, погрешность крылась в обилии мер длины, различающихся по протяженности, но называемых милями, а их легко было перепутать при вычислениях. Так или иначе, но Ньютон был настолько огорчен полученными результатами, что надолго оставил проблему тяготения.

В 1679 г. Гук сообщил, без математических доказательств, что при изменении силы тяготения обратно пропорционально квадрату расстояния орбитой планеты будет эллипс. Это утверждение заставило Ньютона вернуться к проблеме тяготения и решить ее на основе сформулированных им законов механики.

В 1682 г. Ньютон, использовав значение радиуса Земли (в туазах[2]), опубликованное Пикаром в 1671 г., повторил вычисления гравитационного ускорения Луны и нашел совпадение результатов: $g_{☾} = 0{,}27$ см/с^2. К концу 1683 г Ньютон уже построил строгую математическую теорию тяготения и вывел из нее все три закона Кеплера в обобщенном виде, применимом не только к телам Солнечной системе, но и к любым системам обращающихся тел. Ньютон не торопился с публикацией результатов, лишь в 1687 г., и то по настоянию астронома Эдмунда Галлея (1656—1742), издал свой знаменитый труд «Математические основы физики»[3], в котором изложил основы земной и небесной механики.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ВЫВОД ФОРМУЛЫ ЗАКОНА ТЯГОТЕНИЯ

Обозначим через M массу центрального тела (например, Солнца) и через m массу тела-спутника (например, планеты), обращающегося вокруг центрального тела с периодом T на среднем расстоянии $r = a$. Согласно третьему закону Кеплера, по формуле (3.6), $\frac{T^2}{a^3} = C$ (постоянная величина). По второму закону механики Ньютона центральное тело действует на тело-спутник с силой

$$\vec{F} = m\vec{g},$$

[1] Здесь и дальше числа приводятся в метрической системе, которой в ту эпоху не было. Ньютон проводил расчеты в принятых в Англии единицах длины — в футах (1 фут = 30,5 см) и милях. В Англии применялись две мили: морская миля (1852 м), соответствующая 1′ дуги земного меридиана, и уставная миля (1609 м), т. е. первая миля больше второй в 1,15 раза. В других странах значения мили были иными.

[2] По современным определениям старая французская единица длины 1 туаз = 1,95 м.

[3] Дословный перевод «Математические начала натуральной философии». Натуральной философией в ту эпоху называлась новая физика, в отличие от Аристотелевой.

вызывающей центростремительное гравитационное ускорение

$$g = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}, \tag{4.3}$$

или

$$g = \frac{4\pi^2 r}{T^2}\frac{r^2}{r^2} = 4\pi^2\frac{r^3}{T^2}\frac{1}{r^2} = \frac{4\pi^2}{C}\frac{1}{r^2}$$

Обозначив $\frac{4\pi^2}{C} = \mu$ (постоянная величина), найдем

$$g = \frac{\mu}{r^2} \text{ и } F = \mu\frac{m}{r^2} \tag{4.4}$$

Аналогично можно написать, что тело-спутник действует на центральное тело с силой

$$F' = \mu'\frac{M}{r^2}$$

Но по третьему закону механики

$$\vec{F} = -\vec{F'}$$

и поэтому

$$\mu\frac{m}{r^2} = \mu'\frac{M}{r^2}, \text{ или } \mu m = \mu' M, \quad \text{откуда} \quad \frac{\mu}{M} = \frac{\mu'}{m} = G \text{ и } \mu = GM$$

Подставляя это значение μ в формулу (4.4), получим:

$$F = G\frac{Mm}{r^2}, \tag{4.5}$$

т е. все тела тяготеют друг к другу с силой прямо пропорциональной произведению масс тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Коэффициент пропорциональности G называется гравитационной постоянной, и его численное значение зависит исключительно от принятой системы единиц измерения. В Международной системе единиц (СИ) $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н$\cdot$м^2/кг. Но в астрономии эта система единиц пока используется крайне редко, так как дает громоздкие числа, затрудняющие вычисления. Поэтому астрономы используют такие единицы измерения, при которых величины выражаются небольшими числами, и тогда численные значения гравитационной постоянной получаются иными.

Тут же отметим, что астрономы никогда не вычисляют сил тяготения, а находят лишь вызываемые ими ускорения, и потенциальную энергию тела-спутника относительно центрального тела всегда считают отрицательной.

ЗАДАЧА ДВУХ ТЕЛ

Определение орбиты одного тела, движущегося в поле тяготения другого, называется задачей двух тел. Всякое движение относительно, и поэтому определяется орбита менее массивного тела в поле тяготения тела большей массы

(центрального тела). Задача двух тел воплощена в законах Кеплера и теоретически решена Ньютоном. Движение небесных тел по законам Кеплера называют кеплеровским или невозмущенным движением. Строгий вывод этих законов сложен, но мы упростим задачу и выведем уравнение, содержащее сущность двух законов Кеплера.

Сила взаимного тяготения вызывает у тела-спутника гравитационное ускорение

$$g_m = \frac{F}{m} = G\frac{Mm}{r^2 m} = G\frac{M}{r^2},$$

направленное к центральному телу, а у центрального тела — гравитационное ускорение

$$g_M = \frac{F}{M} = G\frac{Mm}{r^2 M} = G\frac{m}{r^2},$$

направленное навстречу. Следовательно, сила взаимного тяготения, удерживая тело-спутник на его орбите, сообщает ему относительно центрального тела центростремительное ускорение

$$g = g_m + g_M = \frac{G(M+m)}{r^2} = \frac{\mu}{r^2}. \qquad (4.6)$$

При значительной массе m тела-спутника величина $\mu = G(M+m)$, и задача двух тел называется общей. Если масса m тела-спутника пренебрежимо мала в сравнении с массой M центрального тела (как, например, массы планет в сравнении с массой Солнца), то задача двух тел называется ограниченной и тогда $\mu = GM$, т. е. зависит только от массы центрального тела.

Пусть тело-спутник (рис. 55) в некоторый момент времени находится от центрального тела на расстоянии, равном среднему расстоянию a, и имеет среднюю или круговую скорость v_a. Тогда кинетическая энергия тела-спутника, имеющего массу m, будет равна:

$$K_a = \frac{mv_a^2}{2},$$

его потенциальная энергия с учетом формулы (4.6)

$$U_a = -mg_a a = -m\frac{\mu}{a^2}a = -m\frac{\mu}{a}$$

и полная механическая энергия

$$K_a + U_a = \frac{mv_a^2}{2} - m\frac{\mu}{a}.$$

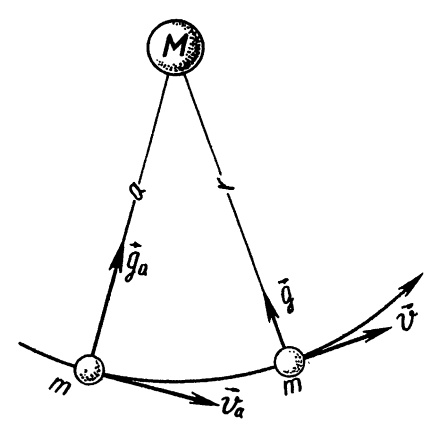


Рис. 55. К выводу уравнения энергии.

При ином расстоянии или радиусе-векторе r скорость тела-спутника будет v и та же энергия

$$K + U = \frac{mv^2}{2} - m\frac{\mu}{r}.$$

В силу закона сохранения механической энергии

$$\frac{mv^2}{2} - m\frac{\mu}{r} = \frac{mv_a^2}{2} - m\frac{\mu}{a}, \quad \text{или} \quad v^2 = v_a^2 + \frac{2\mu}{r} - \frac{2\mu}{a}$$

Но, согласно формуле (4.1), на расстоянии a гравитационное ускорение $g_a = \frac{v_a^2}{a}$, учитывая (4.6), получим: $v_a^2 = \frac{\mu}{a}$

Подставляя это значение v_a^2 в выражение для v^2, найдем:

$$v^2 = \mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right), \tag{4.7}$$

или

$$v = \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}. \tag{4.8}$$

Каждое из выражений (4.7) и (4.8) называется уравнением энергии или интегралом энергии и является одним из основных уравнений небесной механики. Оно позволяет определять вид орбиты тела.

При движении по окружности радиус-вектор r тела не меняет своего значения, т. е. $r = a$, и тогда круговая скорость

$$v_a = \sqrt{\mu\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{r}\right)} = \sqrt{\frac{\mu}{r}}, \tag{4.9}$$

или

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a}}. \tag{4.10}$$

Следовательно, если тело при радиусе-векторе r имеет скорость $v_a = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$, то оно движется вокруг центрального тела по окружности.

Если на расстоянии r тело имеет скорость

$$v_п = \sqrt{\frac{2\mu}{r}}, \tag{4.11}$$

то, подставляя это значение скорости в формулу (4.7), найдем:

$$\frac{2\mu}{r} = \frac{2\mu}{r} - \frac{\mu}{a}, \quad \text{или} \quad \frac{\mu}{a} = 0,$$

и так как $\mu \neq 0$, то $a = \infty$, т. е. тело движется по параболе и не является спутником центрального тела. Поэтому скорость

$$v_п = \sqrt{\frac{2\mu}{r}}$$

называется параболической скоростью. Сравнивая ее с круговой скоростью v_a в формуле (4.9), получим, что всегда параболическая скорость

$$v_п = v_a\sqrt{2}. \tag{4.12}$$

При скорости тела $v > v_п$ оно уходит от центрального тела по гиперболе, а при $v_a < v < v_п$ обращается вокруг центрального тела по эллиптической орбите, что возможно и при $v < v_a$.

Следовательно, первый закон Кеплера в обобщенном виде гласит так: в поле тяготения центрального тела любое другое тело движется по одной из кривых второго порядка (по одному из конических сечений).

Так как скорости тел Солнечной системы весьма разнообразны и равенство (4.9) выдерживается в редких исключениях, то они движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Если скорость тела станет параболической или превысит ее, то тело уйдет из пределов Солнечной системы.

Уравнение энергии (4.8) позволяет вычислить скорость тела в любой точке эллиптической орбиты с большой полуосью a, и для этого совершенно не нужно знать величины $\mu = G(M+m)$.

Поделив равенство (4.8) на (4.10), найдем:

$$v = v_a \sqrt{\frac{2a}{r} - 1}. \tag{4.13}$$

Средняя, или круговая, скорость v_a может быть вычислена по большой полуоси a, выраженной в километрах (км), и периоду обращения T в секундах (с):

$$v_a = \frac{2\pi a}{T} \tag{4.14}$$

Таким образом, формула (4.13) позволяет вычислить скорость тела при любом радиусе-векторе r.

Когда рассматривается движение тела-спутника по эллиптической орбите вокруг произвольного центрального тела, то наиближайшая к нему точка орбиты называется перицентром, а наиболее удаленная — апоцентром. В частных случаях эти точки орбиты получают конкретные наименования путем замены слова «центр» производным от греческого названия центрального тела (за исключением Юпитера), как это указано в таблице:

Центральное тело	Греческое название	Название перицентра	Название апоцентра
Солнце	Ге́лиос	периге́лий	афе́лий
Земля	Ге́я	периге́й	апоге́й
Меркурий	Герме́с	перигерме́сий	апогерме́сий
Венера	Ге́спер и А́фроди́та	периге́сперий	апоге́сперий
Марс	А́рес	периа́рий	апоа́рий
Юпитер	Зевс	перийо́вий[1]	апойо́вий[1]
Сатурн	Кро́нос	перикро́ний	апокро́ний
Луна	Селе́на	периселе́ний	апоселе́ний
Звезда	а́строн	периа́стр	апоа́стр

[1] Эти названия произошли от латинского *Jovis* — родительного падежа имени Юпитера.

Наибольшая скорость тела-спутника будет при наименьшем значении $r = q = a(1-e)$, т. е. в перицентре. Эта наибольшая скорость

$$v_q = v_a \sqrt{\frac{2a}{q} - 1} = v_a \sqrt{\frac{2a - q}{q}},$$

а так как $2a - q = Q = a(1+e)$, то

$$v_q = v_a \sqrt{\frac{Q}{q}}, \text{ или } v_q = v_a \sqrt{\frac{1+e}{1-e}}. \quad (4.15)$$

В апоцентре при $r = Q = a(1+e)$ скорость тела наименьшая и ее значение

$$v_Q = v_a \sqrt{\frac{2a}{Q} - 1} = v_a \sqrt{\frac{2a - Q}{Q}},$$

т. е.

$$v_Q = v_a \sqrt{\frac{q}{Q}}, \text{ или } v_Q = v_a \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \quad (4.16)$$

Перемножив равенства (4.15) и (4.16), найдем, что круговая скорость $v_a = \sqrt{v_q v_Q}$ является средней геометрической величиной из наибольшей и наименьшей скорости.

Законы небесной механики едины для всех систем небесных тел, и все выведенные в общем виде формулы применимы к движению любых тел, как естественных, так и искусственных.

Покажем их применение к Земле. Большая полуось орбиты Земли $a_0 = 1$ а. е. $=$ $= 149\,600\,000$ км $= 149{,}6 \cdot 10^6$ км, эксцентриситет орбиты $e = 0{,}017$, а период обращения вокруг Солнца $T_0 = 365^д{,}26 = 365^д{,}26 \cdot 86\,400^с = 31\,558\,150^с = 31{,}56 \cdot 10^6$ с.

Круговая скорость Земли по орбите

$$v_a = \frac{2\pi a_0}{T_0}, \quad v_a = \frac{2 \cdot 3{,}1416 \cdot 149{,}6 \cdot 10^6 \text{км}}{31{,}56 \cdot 10^6 \text{ с}} = 29{,}78 \text{ км/с},$$

или, округленно, $v_a = 29{,}8$ км/с.

Согласно формулам (4.15) и (4.16), наибольшая скорость Земли (в перигелии, в начале января)

$$v_q = 29{,}8 \text{ км/с} \sqrt{\frac{1 + 0{,}017}{1 - 0{,}017}}, \quad v_q = 30{,}3 \text{ км/с},$$

а наименьшая (в афелии, в начале июля)

$$v_Q = 29{,}8 \text{ км/с} \sqrt{\frac{1 - 0{,}017}{1 + 0{,}017}}, \quad v_Q = 29{,}3 \text{ км/с}.$$

Когда же Земля находится на расстоянии $r = 1{,}01$ а. е. от Солнца, то по формуле (4.13) ее скорость

$$v = 29{,}8 \text{ км/с} \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1{,}01} - 1} = 29{,}8 \sqrt{0{,}98} \text{ км/с} = 29{,}5 \text{ км/с}.$$

Аналогичное решение можно найти для любой планеты, кометы или иного тела Солнечной системы, причем не обязательно вычислять круговую скорость тела по формуле (4.14). Можно воспользоваться круговой скоростью Земли, поскольку в Солнечной системе $\mu = GM$ является постоянной величиной, определяемой только массой Солнца. Согласно формуле (4.10), у любого тела Солнечной системы круговая скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a}},$$

а круговая скорость Земли

$$v_{a_0} = \sqrt{\frac{\mu}{a_0}}, \qquad v_{a_0} = 29{,}8 \text{ км/с}.$$

Поделив одно выражение на другое, найдем:

$$v_a = \frac{v_{a_0}}{\sqrt{a}}, \quad \text{или} \quad v_a = \frac{29{,}8 \text{ км/с}}{\sqrt{a}}, \tag{4.17}$$

причем в эту формулу следует подставлять a в астрономических единицах (а.е.), так как $a_0 = 1$ а. е.

Рекомендуем читателям по данным таблицы 2 (см. с.155) самостоятельно вычислить средние (круговые) и предельные скорости планет.

Теперь покажем элементарный вывод третьего обобщенного закона Кеплера. Примем, что тело-спутник массой m обращается с периодом T вокруг центрального тела массой M по круговой орбите радиуса $r = a$. Тогда, согласно формулам (4.3) и (4.6), у спутника центростремительное гравитационное ускорение

$$g = \frac{4\pi^2 a}{T^2} = \frac{G(M + m)}{a^2},$$

откуда

$$\frac{T^2(M + m)}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G} = \text{const} \quad \text{(постоянной величине).} \tag{4.18}$$

Следовательно, и этот закон действителен для любых систем обращающихся тел и именно поэтому называется третьим обобщенным законом Кеплера. Обозначим индексом 1 величины в одной системе тел, а индексом 2 — в другой системе тел. Тогда в соответствии с формулой (4.18) получим иной вид этого закона:

$$\frac{T_2^2(M_2 + m_2)}{a_2^3} = \frac{T_1^2\,(M_1 + m_1)}{a_1^3}, \tag{4.19}$$

или

$$\frac{T_2^2(M_2 + m_2)}{T_1^2(M_1 + m_1)} = \frac{a_2^3}{a_1^3}. \tag{4.20}$$

В таком виде закон позволяет вычислить отношение масс M_2/M_1 центральных тел систем, если массы m_2 и m_1 их спутников пренебрежимо малы в сравнении с массами центральных тел.

Третий закон Кеплера, написанный в виде формулы (4.20), представляет собой отношение однородных величин. Поэтому при его использовании, как, впрочем, и формулы (4.19), можно не придерживаться определенной системы единиц измерения, лишь бы однородные величины были выражены в одинаковых единицах.

Массы крупных небесных тел Солнечной системы измеряют в массах Земли. Если нужно выразить массу тел в килограммах (кг), то достаточно ее значение умножить на массу Земли $M_0 = 5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг $\approx 6 \cdot 10^{24}$ кг.

ВОЗМУЩЕНИЯ И ОТКРЫТИЕ ДАЛЕКИХ ПЛАНЕТ

Теория тяготения была признана далеко не сразу. Одной из причин возражений против закона тяготения были небольшие отклонения видимого движения планет от вычисленного по кеплеровским законам, называемые возмущениями или неравенствами. Наблюдения этих небольших отклонений стали возможными с появлением оптических измерительных инструментов[1]. Ньютон правильно объяснил возмущения взаимным притяжением планет. Наибольшие возмущения вызывают Юпитер и Сатурн — самые массивные планеты Солнечной системы. Полный триумф закона наступил в 1846 г., и ему предшествовала своя предыстория.

13 марта 1781 г. дотоле неизвестный английский учитель музыки и страстный любитель астрономии Вильям Гершель (1738—1822), наблюдая звездное небо в самодельный телескоп-рефлектор[2], обнаружил в созвездии Близнецов, вблизи эклиптики, объект, отличавшийся от звезд еле различимым диском. В последующие дни объект занимал иные положения, т. е. явно смещался вдоль эклиптики. Гершель принял его за далекую комету, о чем и известил астрономов. Но вычисленная по данным трехмесячных наблюдений орбита объекта оказалась близкой к круговой[3], т. е. планетной орбитой с большой полуосью $a = 19{,}2$ а. е. Стало очевидным, что В. Гершель открыл планету, обращающуюся вокруг Солнца с периодом в 84 года за орбитой Сатурна. Эта планета была названа Ураном, по имени древнегреческого бога неба.

Вскоре в движении Урана обнаружились отклонения, не объяснимые воздействием Юпитера и Сатурна. Поэтому у многих астрономов возникла мысль о существовании за Ураном планеты, возмущающей его движение. К 1840 г., когда Уран со дня его открытия совершил три четверти оборота по орбите, эти отклонения достигли 2′. Перед астрономами встала чрезвычайно сложная задача: по наблюдаемым возмущениям в движении Урана найти приближенную орбиту неизвестной планеты, вычислить ее видимые положения в некоторые даты и затем в телескопы разыскать ее на небе.

---

[1] В 1671 г. открыта Парижская обсерватория (Франция), в 1675 г. — Гринвичская (Англия), в 1725 г. — Петербургская (Россия). Уже к 1755 г. точность определения видимых положений светил достигла 2″, т. е. толщины спички, наблюдаемой с расстояния в 270 м.

[2] Зеркальный телескоп.

[3] Первым вычислил орбиту петербургский академик Андерс Лексель (1740—1784).

Первым за решение этой задачи взялся молодой английский астроном Джон Адамс (1819—1892). 21 октября 1845 г. он представил директору Гринвичской обсерватории Джорджу Эйри (1801—1892) свои вычисления, указав место в созвездии Водолея, где должна была быть планета. Эйри с недоверием отнесся к вычислениям молодого ученого и не принял мер ни к поискам планеты, ни к публикации вычислений Адамса. Но если бы планету стали разыскивать, то нашли бы ее в 1°49′ от места, указанного Адамсом.

Между тем в том же году директор Парижской обсерватории, известный физик Франсуа Араго (1786—1853) предложил своему молодому сотруднику Урбэну Леверье (1811—1877) заняться этой проблемой. Ничего не зная о вычислениях Адамса, Леверье невольно пошел по тому же пути, подсказанному развитием науки. Обоим астрономам было хорошо известно правило Тициуса—Бодэ — закономерность в планетных расстояниях, обнаруженная немецким профессором Иоганном Тициусом (1729—1796) и опубликованная в 1772 г. берлинским астрономом Элертом Бодэ (1747—1826). Она гласила: если написать ряд чисел 0, 3, 6, 12, 24, 48 и 96 и к каждому из них прибавить по 4, то полученные числа дают приближенные расстояния планет от Солнца, выраженные в десятых долях астрономической единицы: 4 (Меркурий), 7 (Венера), 10 (Земля), 16 (Марс), 28 (астероиды[1]), 52 (Юпитер) и 100 (Сатурн)[2]. Открытый Гершелем Уран продолжал этот ряд чисел: $96 \cdot 2 = 192$ и $192 + 4 = 196$, или 19,6 а.е., что близко к среднему расстоянию Урана $a = 19{,}2$ а. е. Поэтому Адамс и Леверье продолжили числовой ряд до неизвестной планеты, приняв в первом приближении большую полуось ее орбиты $a = 38{,}4$ а. е. ($192 \cdot 2 = 384$), а наклонение $i = 0°$.

В июне 1846 г были опубликованы предварительные результаты вычислений Леверье с указанием места планеты в созвездии Водолея. Узнав об этом, Эйри был поражен совпадением результатов вычислений Адамса и Леверье, но лишь в июле английские астрономы начали искать планету. И снова они совершили ошибку: вместо поисков в телескоп с большим увеличением (чтобы увидеть диск планеты), они исследовали положения слабых звезд в надежде заметить смещение звездообразной по виду планеты. В результате небрежного сопоставления наблюдений, выполненных в разные дни, планета не была открыта.

31 августа 1846 г. Леверье представил Парижской академии наук окончательные результаты своих вычислений. 18 сентября 1846 г. Леверье послал берлинскому астроному Иоганну Галле (1812—1910) письмо с просьбой поискать планету в созвездии Водолея. 23 сентября 1846 г. Галле получил это письмо и в тот же вечер обнаружил в телескоп планету всего лишь в 1° от вычисленного места. На следующий вечер Галле повторил наблюдения. Он заметил смещение планеты вдоль эклиптики и убедился в том, что нашел именно ту планету, положение которой вычислили Адамс и Леверье. Новую планету, имеющую цвет морской волны, назвали Нептуном, именем древнеримского бога моря. Любопытно, что Нептун не удовлетворяет правилу Тициуса—Бодэ, так как большая полуось его орбиты оказалась равной 30,1 а. е.

---

[1] Первый астероид открыт 1 января 1801 г. К 1845 г было известно четыре астероида.

[2] Математический вид этого правила: среднее расстояние, выраженное в астрономических единицах, $a = 0{,}1\,(3 \cdot 2^n + 4)$, где для Меркурия $n = -\infty$, для Венеры $n = 0$, для Земли $n = 1$, для Марса $n = 2$, для астероидов $n = 3$, для Юпитера $n = 4$, для Сатурна $n = 5$ и для Урана $n = 6$.

Открытие Нептуна по предварительным вычислениям явилось триумфом закона всемирного тяготения, после чего все сомнения в действии этого закона отпали.

С течением лет в движении Урана снова стали наблюдаться возмущения, не объяснимые воздействием даже Нептуна, которое уже сравнительно точно учитывалось после уточнения орбиты и определения массы планеты[1]. Было очевидно, что оно возмущается еще одной планетой, за поиски которой в самом конце XIX в. взялся американский астроном Персиваль Ловелл (1855—1916). Проведя вместе со своими помощниками колоссальный объем вычислений, Ловелл нашел, что неизвестная планета должна находиться от Солнца на среднем расстоянии в 40 а.е. и выглядеть с Земли звездой около 13-й звездной величины (13^m). Искать ее можно было только путем сравнения фотоснимков неба, на которых получаются изображения сотен тысяч звезд, — задача, прямо скажем, чрезвычайно трудная.

Неудачные попытки найти планету в 1919 г и другие заботы астрономов прервали поиски на 10 лет. Только в апреле 1929 г. их возобновил на Ловелловской обсерватории во Фластгаффе (США) 23-летний астроном Клайд Томбó (р. 1906 г.). После многомесячной работы Томбо нашел планету на фотоснимках, полученных в конце января 1930 г., а затем и на более ранних фотографиях неба. Планета находилась в созвездии Близнецов и выглядела звездой 15^m без заметного диска. 13 марта 1930 г., в день рождения Ловелла, было объявлено об открытии девятой планеты. Ее назвали Плутоном, по имени древнегреческого бога подземного царства. Такое название характеризует слабое освещение планеты Солнцем (в 1600 раз слабее освещения Земли), а первые две буквы П и Л напоминают об инициаторе поисков планеты Персивале Ловелле.

СИЛА ТЯЖЕСТИ НА НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

Когда речь идет о силе тяжести на небесных телах, то подразумевается ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести) на поверхности этих тел, так как вес находящихся там предметов при их неизменной массе определяется ускорением силы тяжести[2]

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

В соответствии с законом тяготения ускорение силы тяжести на поверхности небесного тела

$$g = G\frac{M}{R^2}, \qquad (4.21)$$

где M — масса и R — радиус небесного тела.

Для вычисления ускорения силы тяжести на поверхности небесного тела достаточно знать его массу M и радиус R, выраженные в параметрах Земли.

---

[1] Масса Нептуна вычислена из третьего закона Кеплера по движению спутника Тритона, открытого в октябре 1846 г

[2] Здесь мы не рассматриваем эффектов изменения веса, связанных с вращением небесного тела или с ускоренным вертикальным движением опоры. Эти эффекты изучаются в физике.

В самом деле, на Земле ускорение силы тяжести

$$g_0 = G\frac{M_0}{R_0^2}. \qquad (4.22)$$

Разделив равенство (4.21) на выражение (4.22), а также приняв $M_0 = 1$ и $R_0 = 1$, получим:

$$g = g_0\frac{M}{R^2}, \text{ или } g = g_0 g',$$

где $g_0 = 981$ см/с^2 и $g' = \frac{M}{R^2}$ — относительное гравитационное ускорение в сравнении с земным.

Следовательно, тело, имеющее на Земле вес P_0, на поверхности другого небесного тела будет весить

$$P = P_0 g'.$$

Так, например, в сравнении с земными масса Луны $M = 1/81$, а радиус $R = 0{,}272$ и поэтому $g' = \frac{1}{81 \cdot 0{,}272^2} = \frac{1}{6}$, т. е. вес на поверхности Луны в 6 раз меньше, чем на Земле.

Формула (4.21) позволяет вычислить гравитационное ускорение g_r любого тела сравнительно малой массы в поле тяготения массивного небесного тела, на произвольном расстоянии r от него, так как в ограниченной задаче двух тел

$$g_r = \frac{\mu}{r^2} = G\frac{M}{r^2} \qquad (4.23)$$

Разделив равенство (4.23) на (4.21), получим:

$$g_r = \frac{g}{(r/R)^2} = \frac{g}{r_R^2}, \qquad (4.24)$$

где g — ускорение силы тяжести на поверхности массивного небесного тела, R — его радиус, r — расстояние от центра этого тела и r_R — то же расстояние, выраженное в радиусах небесного тела.

Предлагаем читателям вычислить ускорение силы тяжести на Солнце, Марсе и Юпитере, а также гравитационное ускорение Меркурия, Земли и Плутона в поле тяготения Солнца, чтобы убедиться в их резком различии и получить представление о действии солнечного притяжения на огромных расстояниях. Для удобства вычислений по формуле (4.24) следует принять 1 а. е. = 215 $R_\odot$ (радиусов Солнца).

КОСМИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

С ускорением силы тяжести на небесных телах непосредственно связаны скорости, называемые космическими.

Первой космической скоростью называется круговая скорость у самой поверхности небесного тела. Это наименьшая горизонтальная скорость, при которой какой-либо предмет становится спутником небесного тела и обращается вокруг него по круговой орбите вблизи поверхности тела.

В ограниченной задаче двух тел круговая скорость

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{r}} = \sqrt{G\frac{M}{r}}$$

Так как расстояние поверхности небесного тела от его центра равно радиусу R, то, обозначая первую космическую скорость через w_a, получим:

$$w_a = \sqrt{G\frac{M}{R}}. \qquad (4.25)$$

Но на поверхности небесного тела ускорение силы тяжести

$$g = G\frac{M}{R^2},$$

и поэтому первая космическая скорость

$$w_a = \sqrt{gR}. \qquad (4.26)$$

Подставив в формулу (4.26) средний радиус Земли $R_0 = 6371$ км и ускорение силы тяжести на ее поверхности $g_0 = 9{,}81$ м/с^2 $= 9{,}81 \cdot 10^{-3}$ км/с^2, найдем первую космическую скорость на Земле:

$$w_{a_0} = \sqrt{g_0 R_0} = \sqrt{9{,}81 \cdot 10^{-3} \cdot 6371}, \quad w_{a_0} = 7{,}91 \text{ км/с}. \qquad (4.27)$$

Тот же результат для Земли получим и из формулы (4.25):

$$w_{a_0} = \sqrt{G\frac{M_0}{R_0}}, \quad w_{a_0} = 7{,}91 \text{ км/с}. \qquad (4.28)$$

Учитывая это, найдем первую космическую скорость на поверхности любого небесного тела, разделив равенство (4.25) на (4.28):

$$\frac{w_a}{w_{a_0}} = \sqrt{\frac{M}{M_0} : \frac{R}{R_0}}, \text{ или } w_a = 7{,}91\sqrt{\frac{M}{R}} \text{ км/с.}, \qquad (4.29)$$

причем в формуле (4.29) масса небесного тела M выражена в массах Земли и его радиус R — в радиусах Земли.

Параболическая скорость у поверхности небесного тела называется второй космической скоростью. За ней сохранено также название критической скорости и скорости освобождения, так как при этой скорости преодолевается притяжение небесного тела и предмет покидает его, двигаясь по параболической орбите.

В соответствии с формулой (4.12) вторая космическая скорость

$$w_{\text{п}} = w_a\sqrt{2}.$$

В частности, на Земле критическая скорость

$$w_{\text{п}_0} = 7{,}91\sqrt{2}, \quad \text{т. е.} \quad w_{\text{п}_0} = 11{,}2 \text{ км/с}.$$

Предлагаем читателям вычислить космические скорости на поверхности Луны, Марса и Юпитера. Необходимые данные следует заимствовать из таблицы 3 (см. с.156).

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ

Знание величин космических скоростей необходимо при запуске космических аппаратов — искусственных спутников и межпланетных станций. Ради краткости назовем искусственным спутником любое искусственное тело, свободно обращающееся вокруг естественного массивного небесного тела (Солнца, Луны, планеты), независимо от того, является ли такой спутник сравнительно небольшим объектом, крупной современной орбитальной станцией или космическим кораблем с космонавтами на борту.

Каждый запуск преследует определенную цель. В зависимости от этого сначала рассчитывают орбиту искусственного спутника, а затем скорость его запуска, обеспечивающую движение по этой орбите. Так, например, если требуется изучить состояние одного определенного слоя атмосферы небесного тела или сфотографировать с одинаковых расстояний различные районы его поверхности, то орбита должна быть круговой. Если необходимо исследовать различные слои атмосферы, разные области окружающего небесное тело пространства или создать спутник радиотелесвязи, то в этом случае выбирают эллиптические орбиты.

Выведенный на орбиту искусственный спутник становится небесным телом и поэтому обращается вокруг своего центрального тела по законам Кеплера. В соответствии с первым законом Кеплера, большая ось эллиптической орбиты искусственного спутника проходит через центр (*C*) небесного тела, который находится в одном из фокусов орбиты (рис. 56). Перицентр (*П*) и апоцентр (*A*) получают наименования по названию небесного тела (см. с. 92). Линейные расстояния этих точек от поверхности небесного тела представляют собой пределы высоты полета спутника и называются высотой перицентра ($h = kП$) и высотой апоцентра ($H = nA$).

Чтобы рассчитать орбиту, необходимо знать средний радиус *R* небесного тела и задать либо оба предела высоты полета, либо один из них и период обращения спутника. Все линейные размеры принято выражать в километрах, а периоды обращения — в минутах. Тогда, при заданных пределах высоты полета *h* и *H*, перицентрическое расстояние спутника

$$q = R + h, \qquad (4.30)$$

его апоцентрическое расстояние

$$Q = R + H, \qquad (4.31)$$

большая полуось орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2} = R + \frac{h + H}{2} \qquad (4.32)$$

и эксцентриситет орбиты

$$e = 1 - \frac{q}{a}. \qquad (4.33)$$

Рис. 56. Расчет орбиты искусственного спутника.

Период обращения искусственного спутника связан с большой полуосью его орбиты третьим обобщенным законом Кеплера. Проще всего сравнить движение искусственного спутника любого небесного тела с обращением искусственного спутника Земли, например спутника связи «Молния-1», выведенного на орбиту 14 октября 1965 г.

Обозначим через M массу небесного тела, выраженную в массах Земли, через T — период обращения (в минутах) искусственного спутника этого тела и через a — большую полуось (в километрах) орбиты спутника; у спутника связи «Молния-1» период обращения $T_0 = 719^{м}$ и большая полуось орбиты $a_0 = 26\,580$ км; масса Земли $M_0 = 1$ (принята за единицу).

Так как массы искусственных спутников исчезающе малы в сравнении с массой небесных тел, то, согласно формуле (4.19),

$$\frac{T^2 M}{a^3} = \frac{T_0^2 M_0}{a_0^3},$$

откуда

$$T^2 = \frac{T_0^2}{a_0^3}\frac{a^3}{M} = \frac{719^2}{26\,580^3}\frac{a^3}{M},$$

или

$$T^2 = 2{,}752 \cdot 10^{-8}\frac{a^3}{M} \qquad (4.34)$$

и

$$T = 1{,}658 \cdot 10^{-4} a \sqrt{\frac{a}{M}} \text{ (в минутах)}, \qquad (4.35)$$

а большая полуось орбиты спутника

$$a = 331{,}2 \sqrt[3]{MT^2} \text{ (в километрах)}. \qquad (4.36)$$

Продолжительность пролета спутника над различными полушариями центрального небесного тела зависит от эксцентриситета орбиты спутника. Назовем перицентрийным то полушарие центрального небесного тела, над которым находится перицентр орбиты спутника, а противоположное полушарие назовем апоцентрийным. Чтобы вычислить продолжительность пролета t спутника над перицентрийным полушарием, необходимо знать площадь σ_q эллиптического сегмента $d\Pi fCd$, на котором лежит перицентр орбиты спутника (см. рис. 56). С достаточной степенью точности

$$\sigma_q = \frac{\pi a^2 (1-e)^2 (3+2e)^2}{18},$$

а так как площадь эллипса $\sigma = \pi a^2 \sqrt{1-e^2}$, то по второму закону Кеплера

$$\frac{t}{T} = \frac{\sigma_q}{\sigma},$$

откуда

$$t = \frac{\sigma_q}{\sigma} T, \qquad t = \frac{(1-e)^2 (3+2e)^2}{18\sqrt{1-e^2}} T. \qquad (4.37)$$

Над апоцентрийным полушарием центрального небесного тела спутник пролетает за промежуток времени

$$\tau = T - t. \tag{4.38}$$

Сравним продолжительность пролета над полушариями небесного тела двух спутников, один из которых обращается по круговой орбите ($e = 0$), а другой — по эллиптической орбите с эксцентриситетом $e = 0,6$. Согласно формуле (4.37), первый спутник пролетает над одним полушарием небесного тела за промежуток времени

$$t = \frac{1 \cdot 3^2}{18} T = 0,5T,$$

т. е. за половину своего периода обращения T, и столько же времени $\tau = T - t = 0,5T$ летит над противоположным полушарием.

Второй спутник пролетает над перицентрийным полушарием за промежуток времени

$$t = \frac{(1-0,6)^2 \cdot (3 + 2 \cdot 0,6)^2}{18\sqrt{1-0,6^2}} T = 0,2T,$$

а значительную часть

$$\tau = T - 0,2T = 0,8T$$

летит над апоцентрийным полушарием.

Поскольку в ограниченной задаче двух тел круговая скорость спутника

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a}} = \sqrt{G\frac{M}{a}},$$

а первая космическая скорость у поверхности Земли

$$w_{a_0} = \sqrt{G\frac{M_0}{R_0}} \text{ и } w_{a_0} = 7,91 \text{ км/с},$$

то, разделив первое равенство на второе, получим:

$$v_a = 7,91\sqrt{\frac{M}{M_0}\frac{R_0}{a}}.$$

Подставив сюда значение среднего радиуса Земли $R_0 = 6371$ км, найдем круговую скорость спутника

$$v_a = 631,3\sqrt{\frac{M}{a}}, \tag{4.39}$$

где обязательно a выражено в километрах, M — в массах Земли, тогда скорость получается в километрах в секунду

Скорости спутника в перицентре (v_q) и апоцентре (v_α) вычисляют по формулам (4.15) и (4.16), а в произвольной точке орбиты по формуле (4.13).

Скоростью запуска (или начальной скоростью) $v_н$ называется та скорость, которую сообщают спутнику при непосредственном выводе его на орбиту,

т е. когда спутник отделяется от поднимающей его ракеты. Если имеется возможность, то легче всего вывести спутник в перицентре, на наименьшей высоте. Тогда ему надо сообщить в горизонтальном направлении скорость $v_н = v_q$

В виде примера вычислим параметры обращения вокруг Венеры советской автоматической межпланетной станции «Венера-10», выведенной 25 октября 1975 г. на орбиту искусственного спутника планеты с высотой перигесперия[1] $h = 1400$ км и высотой апогесперия $H = 114\,000$ км. Значения радиуса Венеры $R = 6050$ км и ее массы $M = 0{,}815$ возьмем из таблицы 3 (см. с.156).

Вычисления проведем по формулам (4.30) — (4.39), (4.15) и (4.16), используя логарифмическую линейку.

Перигесперийное расстояние станции

$$q = R + h,\ q = 6050\ \text{км} + 1400\ \text{км} = 7450\ \text{км},$$

апогесперийное расстояние

$$Q = R + H,\ Q = 6050\ \text{км} + 114\,000\ \text{км} = 120\,050\ \text{км},$$

большая полуось орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2} = \frac{7450\,\text{км} + 120\,050\,\text{км}}{2} = 63\,750\ \text{км},$$

эксцентриситет орбиты

$$e = 1 - \frac{q}{a} = 1 - \frac{7450\ \text{км}}{63\,750\ \text{км}} = 0{,}884,$$

период обращения станции

$$T = 1{,}658\ 10^{-4} a \sqrt{\frac{a}{M}}\ \text{мин} = 1{,}658 \cdot 10^{-4} \cdot 63\,750\ \sqrt{\frac{63\,750}{0{,}815}}\ \text{мин} = 2960^{\text{м}},\ \text{или}\ T = 49^{\text{ч}}20^{\text{м}}$$

Реальный период обращения станции был $49^{\text{ч}}23^{\text{м}}$, так что вычисления на логарифмической линейке дали погрешность всего лишь

$$\frac{49^{\text{ч}}23^{\text{м}} - 49^{\text{ч}}20^{\text{м}}}{49^{\text{ч}}23^{\text{м}}} = \frac{3^{\text{м}}}{2963^{\text{м}}} = 0{,}001,\ \text{или}\ 0{,}1\%\ (!),$$

т. е. вполне достаточную точность при приближенных вычислениях.

Над перигесперийным полушарием Венеры станция пролетала за промежуток времени

$$t = \frac{(1-e)^2(3 + 2e)^2}{18\sqrt{1-e^2}}\,T,\ t = \frac{(1-0{,}884)^2 \cdot (3 + 2\ 0{,}884)^2}{18 \cdot \sqrt{1-0{,}884^2}}\ 2960^{\text{м}} = 108^{\text{м}},\ \text{или}\ t = 1^{\text{ч}}48^{\text{м}},$$

а остальную часть периода обращения

$$\tau = T - t = 49^{\text{ч}}20^{\text{м}} - 1^{\text{ч}}48^{\text{м}} = 47^{\text{ч}}32^{\text{м}}$$

пролетала над апоцентрийным полушарием планеты.

---

[1] Названия точек орбиты см. на с. 92.

Круговая скорость станции

$$v_a = 631{,}3\sqrt{\frac{M}{a}}, \qquad v_a = 631{,}3\sqrt{\frac{0{,}815}{63\ 750}}\text{км/с} = 2{,}26\ \text{км/с},$$

ее скорость в перигеспèрии

$$v_q = v_a\sqrt{\frac{Q}{q}},\ v_q = 2{,}26\ \text{км/с}\sqrt{\frac{120\ 050\,\text{км}}{7450\,\text{км}}} = 2{,}26\ \text{км/с}\cdot 4{,}01 = 9{,}07\ \text{км/с}$$

и скорость в апогеспèрии

$$v_Q = v_a\sqrt{\frac{q}{Q}} = \frac{v_a}{\sqrt{\frac{Q}{q}}},\ \text{т. е.}\ v_Q = \frac{2{,}26}{4{,}01}\ \text{км/с} = 0{,}56\ \text{км/с}.$$

Используя публикуемые в газетах сведения о запусках искусственных спутников и орбитальных космических кораблях, читатель теперь сумеет самостоятельно вычислить параметры их обращения. В частности, полезно вычислить эти параметры для спутников связи «Молния», чтобы убедиться в необходимости их запуска по вытянутым эллиптическим орбитам, апогеи которых располагаются над северным полушарием Земли, на высоте в десятки тысяч километров, что обеспечивает длительную ретрансляцию телевизионных и радиопередач.

В зависимости от поставленных целей запуски искусственных спутников Земли проводятся под различными углами к плоскости ее экватора. Спутники, запущенные в плоскости географических меридианов, проходят над обоими географическими полюсами Земли и называются полярными спутниками; наклонение их орбит $i = 90°$ Спутники с наклонением орбит $i = 0°$ движутся в плоскости экватора и называются экваториальными. При запуске по круговой орбите в направлении с запада к востоку, с периодом вращения Земли $P_0 = 23^ч56^м$, 1 экваториальный спутник «висит» над одним и тем же местом земной поверхности, медленно смещаясь на фоне звездного неба по небесному экватору к востоку, с угловой скоростью суточного вращения неба. Такой спутник называется стационарным (т е. «неподвижным»), и по формулам (4.36) и (4.30) нетрудно вычислить его высоту над земной поверхностью, а по формуле (4.39) — его скорость.

По измеренному периоду обращения искусственных спутников можно определить массу центрального небесного тела, вычислив ее по формуле (4.34). Именно так и была уточнена масса Луны, вычисление которой рекомендуем провести читателю по параметрам движения искусственного спутника «Луна-12», выведенного 25 октября 1966 г. на селеноцентрическую орбиту[1] с большой полуосью в 2660 км и обращавшегося с периодом в $3^ч25^м$ (ответ: 0,0123 массы Земли).

Совершенно очевидно, что формулы (4.30) — (4.39) вполне применимы и к движению естественных спутников планет

АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ

Автоматические межпланетные станции (АМС) направляют к Луне и планетам с целью изучения этих небесных тел. Расчет реальных орбит АМС очень сложен, в особенности при запуске к планетам. Ведь в начале полета межпланетная станция движется в поле тяготения Земли, затем, подавляющую часть своего

[1] Орбита вокруг Луны (от греческого «Селена» — Луна).

пути, в гравитационном поле Солнца и наконец в поле тяготения исследуемой планеты. Помимо этого приходится учитывать эллиптичность планетных орбит и гравитационные воздействия (возмущения) со стороны крупных небесных тел. Поэтому здесь мы покажем лишь принцип расчета простейшей орбиты межпланетной станции в поле тяготения Солнца, принимая орбиты планет круговыми и не учитывая возмущений в движении станций. Такой орбитой, требующей минимальной затраты энергии на запуск, является полуэллиптическая, касающаяся своими вершинами орбит Земли и планеты. В соответствии с первым законом Кеплера Солнце находится в одном из фокусов этой орбиты, большая ось которой проходит через Солнце и Землю.

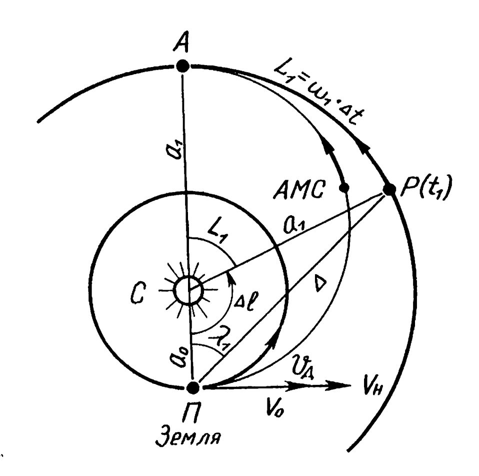


Рис. 57. Простейшая орбита полета космического аппарата к верхней планете.

При запуске к верхней планете (рис. 57) перигелий *П* орбиты межпланетной станции совпадает с Землей и отстоит от Солнца (*С*) на расстоянии $q = a_0 =$ $= 1$ а. е., а афелий *А* находится на пересечении большой оси орбиты *АМС* с орбитой планеты и удален от Солнца на расстояние Q, равное гелиоцентрическому расстоянию a_1 этой планеты, т е. $Q = a_1$ а. е. Сама планета в день запуска t_1 находится в некоторой точке $P(t_1)$ своей орбиты. В день сближения t_2 с межпланетной станцией планета должна подойти к афелию *А*. Сам запуск проводится в сторону движения Земли, с тем чтобы использовать ее орбитальную (гелиоцентрическую) скорость V_0.

Во время полета в гравитационном поле Солнца межпланетная станция полностью подчиняется законам движения планет. Большая полуось ее орбиты, выраженная в астрономических единицах (а. е),

$$a = \frac{q + Q}{2} = \frac{a_0 + a_1}{2},$$

эксцентриситет орбиты

$$e = 1 - \frac{q}{a} = 1 - \frac{1}{a},$$

измеренная в годах продолжительность полета станции (равная полупериоду обращения по орбите)

$$\Delta t = \frac{a\sqrt{a}}{2} \qquad (4.40)$$

и круговая гелиоцентрическая скорость в километрах в секунду[1]

$$V_a = \frac{29{,}8}{\sqrt{a}}.$$

[1] См. формулы (3.7) на с. 71 и (4.17) на с. 94.

Так как запуск проводится в перигелии орбиты, то начальная гелиоцентрическая скорость станции

$$V_н = V_q = V_a \sqrt{\frac{Q}{q}} = V_a \sqrt{a_1},$$

в которую входит скорость Земли $V_0 = 29{,}8$ км/с. Следовательно, чтобы межпланетная станция вышла на расчетную орбиту, необходимо сообщить ей дополнительную скорость

$$v_д = V_н - V_0 = V_н - 29{,}8 \text{ км/с}.$$

Но чтобы покинуть Землю, межпланетной станции нужно еще преодолеть притяжение Земли, на что требуется кинетическая энергия $\frac{mw_п^2}{2}$, где m — масса станции, а $w_п = 11{,}2$ км/с — вторая космическая скорость на земной поверхности. Поэтому скорость запуска $v_н$ станции с Земли определяют из равенства

$$\frac{mv_н^2}{2} = \frac{mv_д^2}{2} + \frac{mw_п^2}{2},$$

откуда

$$v_н = \sqrt{v_д^2 + w_п^2}$$

Необходимо также рассчитать подходящий день запуска, иначе межпланетная станция придет в афелий своей орбиты либо раньше, либо позже планеты и их сближение не произойдет. Планета, обращаясь вокруг Солнца с сидерическим периодом T_1, перемещается по своей орбите со средней угловой скоростью (средним суточным движением) $\omega_1 = 360°/T_1$. За найденную по формуле (4.40) продолжительность полета станции Δt (которую при необходимости следует выразить в сутках) планета проходит угловой путь

$$L_1 = \omega_1 \cdot \Delta t = \frac{360°}{T_1} \cdot \Delta t.$$

В день t_1 старта межпланетной станции разность гелиоцентрической долготы[1] планеты и Земли

$$\Delta l = 180° - L_1, \tag{4.41}$$

геоцентрическое расстояние планеты (в астрономических единицах)

$$\Delta = \sqrt{1 + a_1^2 + 2a_1 \cos L_1},$$

а ее западная элонгация λ_1, т е. угловое удаление от Солнца, видимое с Земли, вычисляется по теореме синусов из равенства

$$\sin\lambda_1 = \frac{a_1}{\Delta}\sin L_1. \tag{4.42}$$

Следовательно, межпланетные станции запускают в дни, в которые разность Δl гелиоцентрической долготы планеты и Земли, а также элонгация планеты

[1] См. с. 105, рис. 57.

близки к вычисленным по формулам (4.41) и (4.42). Тогда станция сблизится с планетой в день

$$t_2 = t_1 + \Delta t.$$

Когда межпланетная станция подойдет к афелию своей орбиты, ее гелиоцентрическая скорость

$$V_Q = V_a \sqrt{\frac{q}{Q}} = \frac{V_a}{\sqrt{a_1}},$$

а у планеты, с которой станция сближается, гелиоцентрическая скорость

$$V_1 = \frac{29{,}8}{\sqrt{a_1}} \text{ км/с}.$$

Чтобы благополучно опуститься на поверхность планеты, межпланетная станция должна при подлете уравнять свою скорость со скоростью планеты, т. е. изменить свою скорость на величину $\Delta v = V_Q - V_1$, а при посадке на поверхность планеты погасить вторую космическую скорость, свойственную этой планете. Такие операции проводятся включением на короткое время тормозного и посадочного двигателей станции.

Поскольку одинаковые конфигурации каждой планеты наступают через синодический период S ее обращения, то очередные запуски к ней проводятся через интервалы времени, кратные этому периоду.

Хотя рассмотренная выше схема полета межпланетной станции приближенна, тем не менее результаты получаются вполне удовлетворительными, в чем читатель может убедиться, проведя вычисления полета станции к Юпитеру: западная элонгация планеты получится около $\lambda_1 = 72°$. В 1972 г. в такой элонгации Юпитер находился 7 марта, а 3 марта к нему стартовала американская межпланетная станция «Пионер-10». Средний синодический период обращения Юпитера $S = 399$ суток, и поэтому очередная станция «Пионер-11» была направлена к Юпитеру через 398 суток, т. е. 5 апреля 1973 г. Советские межпланетные станции посылались к Венере через интервалы времени от 573 до 588 суток в полном соответствии с ее синодическим периодом обращения.

ГЛАВА V

ЛУНА И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗЕМЛЮ

ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ

Самое близкое к Земле небесное тело — Луна — является спутником Земли. Луна не только участвует в суточном вращении неба, но и сравнительно быстро смещается на фоне звезд с запада к востоку, за один час примерно на 0°,5 (т. е. на величину ее видимого диаметра), а за сутки — на 13°. Поэтому она восходит над горизонтом, кульминирует и заходит за горизонт позже, чем накануне, в среднем на 52 мин. С запада к востоку Луна перемещается по большому кругу— лунному пути, наклонение которого к небесному экватору плавно меняется за 9 лет и 3,5 месяца в пределах от 18 до 29° Полный оборот по нему Луна завершает за промежуток времени $T = 27{,}32$ суток, называемый звездным или сидерическим месяцем.

Лунный путь проходит по зодиакальным созвездиям и пересекается с эклиптикой в двух диаметрально противоположных точках, называемых лунными узлами. В одном из них, восходящем узле ☊[1], Луна поднимается над эклиптикой (т. е. переходит к северу от нее), а в нисходящем узле ☋ опускается под нее (т. е. переходит к югу от эклиптики). Наклонение лунного пути к эклиптике составляет в среднем $i = 5°09'$ (с колебаниями от $i = 4°59'$ до $i = 5°19'$). Поэтому Луна всегда находится вблизи эклиптики. Плоскость лунного пути сравнительно быстро поворачивается с востока к западу (т. е. навстречу движению Луны), и поэтому лунные узлы непрерывно перемещаются по эклиптике в том же направлении. За сидерический месяц они сдвигаются почти на 1°,5 (т. е. на три видимых лунных диаметра!), а за год — на 19°,3. Период обращения лунных узлов по эклиптике равен 18 годам 7 месяцам, а точнее — 6798 суткам. Таким образом, каждый свой оборот по небу Луна, по существу, совершает по новому пути и только через 18 лет 7 месяцев возвращается к исходному.

Многократные измерения (в том числе и радиолокационные) показали, что при каждом обороте Луна приближается к Земле и удаляется от нее на неодинаковые расстояния: наименьшее, или перигейное, расстояние Луны бывает в пределах от $q_1 = 356\,410$ км до $q_2 = 369\,960$ км, а наибольшее, или апогейное, расстояние — от $Q_1 = 404\,170$ км до $Q_2 = 406\,740$ км. Поэтому, когда Луна находится в перигее, ее диск имеет диаметр от 33′,5 до 32′,5, а в апогее — от 29′,6 до 29′,3, но в общем близок к 0°,5. чаще всего перигейное расстояние Луны $q = 363\,300$ км, апогейное расстояние $Q = 405\,500$ км и среднее расстояние $a = 384\,400$ км. Из-за непостоянства расстояний горизонтальный экваториальный параллакс Луны, в среднем равный 57′,0, тоже меняется в пределах от 61′,5 до 53′,9.

[1] Знак ☊ имеет древнее происхождение и изображает дракона, набрасывающегося на Солнце, — в этом невежественные люди полагали причину солнечных затмений.

Поскольку Луна всегда сопровождает Землю в ее годовом движении, то она действительно является спутником нашей планеты. Но обращается ли она вокруг Земли или движется как-то иначе, — на этот вопрос можно ответить двояко. Наблюдая видимое движение Луны вокруг Земли по большому кругу, меняющему свое положение на небе, можно считать, что в пространстве Луна обращается вокруг Земли по эллиптической орбите, элементы которой, под возмущающим действием Солнца и несферической формы Земли, изменяются (возмущаются) в определенных пределах. Тогда наклонение лунного пути к эклиптике $i = 5°09' \pm 10'$ объясняется таким же наклонением (с покачиванием) плоскости лунной орбиты к плоскости земной орбиты, а отступление лунных узлов — поворотом плоскости лунной орбиты с востока к западу, вследствие чего поворачивается линия пересечения обеих плоскостей, называемая линией узлов. Помимо этого, сама лунная орбита поворачивается в своей плоскости в прямом направлении, с периодом в 8 лет 10 месяцев, а точнее — в 3232 суток, т е. почти на 41° за год, или около 3° (шесть видимых лунных диаметров!) за один период обращения Луны. Таким образом, движение Луны очень сложно. Но при общем его описании, без подробностей, считают большую полуось лунной орбиты $a = 384\,400$ км, эксцентриситет $e = 0{,}055$ (точнее, $e = 0{,}0549$), наклонение $i = 5°09'$, а период обращения вокруг Земли, или звездный месяц, $T = 27^д{,}32$ (точнее, $T = 27^д{,}3217 = 27^д7^ч43^м$).

В соответствии со вторым законом Кеплера скорость движения Луны относительно Земли (геоцентрическая скорость) переменна. Средняя, или круговая, геоцентрическая скорость

$$v_a = \frac{2\pi a}{T}, \quad v_a = 1{,}02 \text{ км/с}.$$

В перигее скорость Луны возрастает до $v_q = 1{,}08$ км/с, а в апогее уменьшается до $v_Q = 0{,}97$ км/с.

Итак, можно считать, что Луна обращается вокруг Земли по эллиптической орбите. Но всякое движение относительно, и если с Солнца наблюдать движение Земли и Луны на фоне звездного неба, то не будет ошибкой полагать Землю и Лучу за двойную планету. В самом деле, легко вычислить (см. с. 98), что Солнце вызывает у Земли и Луны гравитационное ускорение $g_r = 0{,}59$ см/с^2, а Луна испытывает со стороны Земли ускорение $g = 0{,}27$ см/с^2. Следовательно, можно утверждать, что Луна под действием первого ускорения движется вокруг Солнца, а второе ускорение, меньшее по значению, возмущает это движение.

В эпохи противостояний Солнцу (рис. 58), когда Луна движется за земной орбитой, ее геоцентрическая скорость $v_a = 1{,}02$ км/с направлена в сторону движения Земли ($V_0 = 29{,}78$ км/с) и поэтому гелиоцентрическая скорость Луны

$$V = V_0 + v_a, \quad V = 30{,}80 \text{ км/с}.$$

В эпохи соединений с Солнцем (рис. 59) Луна проходит между ним и Землей и скорости v_a и V_0 противоположны. Но гелиоцентрическая скорость Луны

$$V = V_0 - v_a, \quad V = 28{,}76 \text{ км/с}$$

по-прежнему направлена в сторону орбитального движения Земли, т е. Луна, как и Земля, обращается вокруг Солнца.

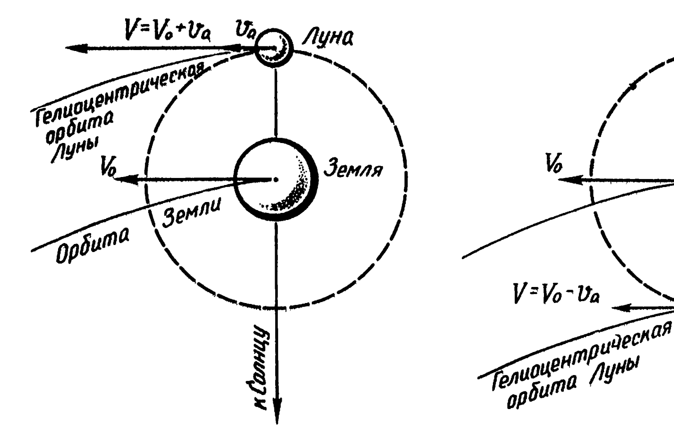


Рис. 58. Гелиоцентрическая скорость Луны в противостоянии с Солнцем.

Рис. 59. Гелиоцентрическая скорость Луны в соединении с Солнцем.

Гелиоцентрическая орбита Луны всегда направлена вогнутостью к Солнцу (рис. 60), близка к земной, но все же отличается от эллиптической из-за возмущающего воздействия Земли. Образно говоря, Земля своим тяготением то разгоняет Луну, заставляя ее обгонять себя вне земной орбиты, то, наоборот, тормозит ее движение, и Луна, уменьшая скорость, отстает от Земли, проходя уже внутри земной орбиты. Наглядной моделью такого обращения может быть совместное движение двух автомобилей по периферии площади вокруг ее центра. Представим себе, что первый автомобиль объезжает площадь по окружности со скоростью 30 км/ч, а второй, всегда находясь вблизи первого, совершает аналогичный путь с переменной скоростью в пределах от 29 до 31 км/ч и притом так, что отстает от первого автомобиля внутри его траектории, а обгоняет — за нею. Тогда путь второго автомобиля, хотя и близок к окружности, все же отличается от нее. Наблюдатель же, находящийся в первом автомобиле, видя, как второй автомобиль последовательно проходит со всех сторон от него, вправе утверждать, что этот автомобиль обращается вокруг первого со скоростью v_a = 31 км/ч — 30 км/ч = 30 км/ч — 29 км/ч = 1 км/ч. В этом проявляется относительность движения.

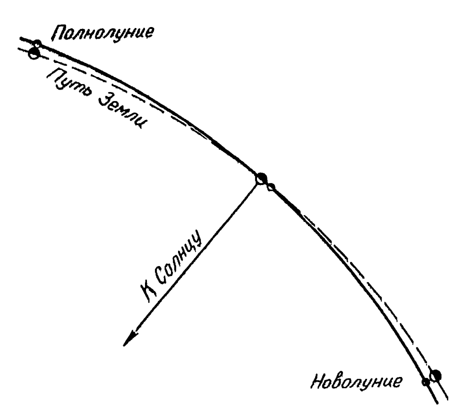


Рис. 60. Гелиоцентрическая орбита Луны.

В своем движении вокруг Солнца Земля тоже испытывает со стороны своего спутника Луны небольшие возмущения. Но такие незначительные детали не существенны для общих правильных представлений о движении планет и их спутников по законам Кеплера.

С Земли видно только одно полушарие Луны, что часто воспринимается как отсутствие осевого ее вращения. Но если бы Луна не вращалась, то с Земли поочередно были бы видны оба ее полушария, в чем легко убедиться, обводя вокруг себя невращающийся шаровидный предмет. Если же медленно поворачивать предмет вокруг его оси в направлении обвода и с тем же периодом, то будет видно только одно его полушарие. Луна именно поэтому и обращена к Земле одним полушарием, что медленно вращается вокруг своей оси в прямом направлении с периодом, равным звездному месяцу $T = 27^д,32$, — такова продолжительность ее звездных суток[1].

ЛУННЫЕ ФАЗЫ

Лунной фазой называется видимая в солнечном освещении часть лунного диска. Математически она определяется отношением наибольшей ширины (b) освещенной части диска ко всему его диаметру (d), т. е. фаза

$$\phi = \frac{b}{d}$$

Лунную фазу характеризуют также возрастом Луны, т е. числом дней, протекших после очередного новолуния, при котором возраст в $= 0^д,0$.

На рисунке 61 показаны различные положения Луны на ее орбите и рядом — лунные фазы, видимые с Земли. Новолуние наступает при соединении Луны с Солнцем, когда она проходит между ним и Землей, но из-за наклонения своей орбиты ($i = 5°09'$) выше или ниже его. В это время к Земле обращено неосвещенное лунное полушарие, и поэтому Луна не видна, ее фаза $\phi = 0,0$. При новолунии Луна восходит и заходит почти одновременно с Солнцем и находится на небе днем.

После новолуния Луна постепенно отходит к востоку от Солнца (она восходит днем). Примерно через двое суток она становится видимой по вечерам в западной области неба в форме узкого серпа ($\phi \approx 0,1$), выпуклость которого обращена к западу, где в это время под горизонтом находится Солнце, освещающее Луну. Через полтора-два часа после захода Солнца серповидная Луна тоже заходит за горизонт.

Линия, отделяющая освещенную часть лунного диска от неосвещенной его части, называется лунным терминатором. На поверхности Луны терминатор имеет вид окружности, а с Земли виден в форме полуэллипса. При возрастающей фазе Луны на ее терминаторе восходит Солнце. Так как Луна вращается вокруг своей оси

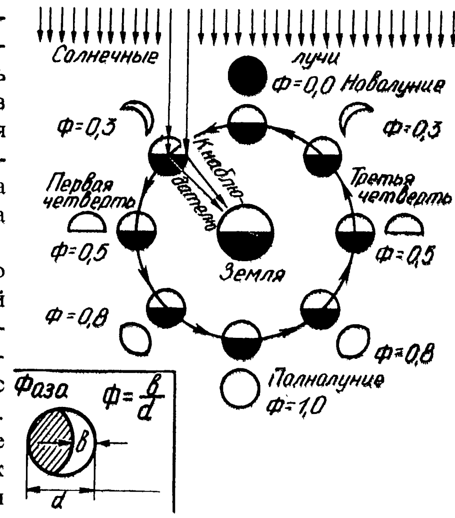


Рис. 61 Смена лунных фаз.

[1] О причине этого см. на с. 128.

в прямом направлении, с запада к востоку, то терминатор, как и на Земле, перемещается по лунной поверхности с востока к западу, в направлении от правого края лунного диска к его левому краю. Поэтому, хотя правая половина лунного диска обращена к западной стороне земного горизонта, она называется восточной половиной и входит в восточное полушарие Луны, а левая половина лунного диска называется западной и принадлежит западному полушарию Луны[1]

Часто при серповидной фазе виден очень слабо освещенный весь лунный диск. Создается впечатление, что в яркий лунный серп вложено темное полушарие меньшего диаметра. Это явление получило название пепельного света. Объясняется оно тем, что лунный серп освещается непосредственно Солнцем, а остальная лунная поверхность — рассеянным солнечным светом, отраженным от Земли. Видимое же различие в диаметрах темного диска и яркого серпа — явление чисто кажущееся, называемое иррадиацией (от латинского *irradiare* — сиять). Оно объясняется особенностями нашего зрения: яркий предмет воспринимается нами несколько больших размеров, нежели темный.

По мере смещения Луны к востоку от Солнца видимая с Земли освещенная часть лунной поверхности увеличивается, лунная фаза растет. Через неделю после новолуния, когда Луна отойдет на 90° от Солнца (Луна в восточной квадратуре), уже видна вся правая половина лунного диска — наступает фаза первой четверти (ф = 0,50, в = $7^{\text{д}},4$). В этой фазе Луна восходит днем, к вечеру видна в южной области неба и заходит ночью.

Через 14—15 суток после новолуния Луна приходит в противостояние с Солнцем (на 180° от него). Ее фаза становится полной (ф = 1,0, в = $14^{\text{д}},8$), так как Солнце освещает все лунное полушарие, обращенное к Земле. Поскольку полная Луна находится в противоположной Солнцу области неба, то она восходит при заходе Солнца, заходит при его восходе, а в середине ночи видна в южной стороне неба, вблизи небесного меридиана.

После полнолуния Луна постепенно приближается к Солнцу с запада, освещается им слева (с востока), и поэтому ущерб Луны, т е. уменьшение ее фазы, начинается с правого края, а выпуклость освещенной части обращена к востоку. Теперь уже на лунном терминаторе, видимом с Земли, Солнце заходит и там наступает ночь.

Примерно через неделю, когда угловое расстояние между Луной и Солнцем сократится до 90° (Луна в западной квадратуре), наступает фаза третьей, или последней, четверти (ф = 0,50, в = $22^{\text{д}},2$), при которой Луна восходит вблизи полуночи, к восходу Солнца она оказывается в южной стороне неба, заходит Луна днем.

При дальнейшем сближении Луны с Солнцем ее убывающие фазы становятся серповидными с выпуклостью влево (к востоку). Луна восходит и видна в восточной области неба незадолго до восхода Солнца, заходит днем перед его заходом и вскоре снова вступает с ним в соединение (новолуние).

Период смены лунных фаз, называемый синодическим или лунным месяцем, продолжительнее сидерического месяца. Представим себе, что в некоторый

---

[1] До недавнего времени считалось наоборот, т е. ориентировали края лунного диска по сторонам земного горизонта, что необходимо иметь в виду при использовании книг прежних изданий.

момент времени Луна ($Л_1$) в полной фазе видна с Земли (положение *1*, рис. 62) в зодиакальном созвездии Льва. За сидерический месяц $T = 27^д,32$ Земля пройдет по своей орбите путь $l = \omega_0 T$, $l = 0°,986 \cdot 27^д,32 \approx 27°$ и окажется в положении *2*, а Луна, совершив в том же направлении один оборот (360°) вокруг Земли, вернется в прежнюю точку своей орбиты ($Л_2$) и снова будет видна в созвездии Льва, но уже в меньшей фазе, так как ее противостояние Солнцу еще не наступило. Чтобы вновь настало полнолуние, Луне нужно достичь положения $Л$, т. е. пройти дугу $Л_2Л \approx 27°$. Так как среднее суточное смещение Луны $\omega = 13°,2$, а Земли в том же направлении $\omega_0 \approx 1°$, то дугу $Л_2Л = 27°$ Луна пройдет за промежуток времени

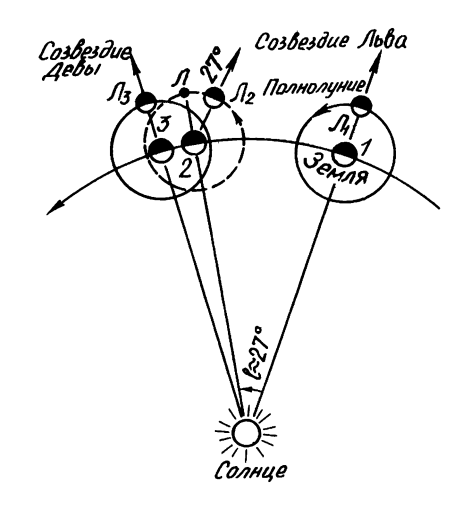


Рис. 62. Продолжительность синодического месяца.

$$\Delta t = \frac{Л_2Л}{\omega - \omega_0} = \frac{27°}{12°,2} = 2^д,21.$$

За этот интервал времени Земля переместится в положение *3*, а Луна — в положение $Л_3$ (см. рис. 62) и опять будет видна в полной фазе, но уже не в созвездии Льва, а в смежном с ним созвездии Девы.

Таким образом, промежуток времени между полнолуниями, или синодический месяц

$$S = T + \Delta t = 27^д,32 + 2^д,21 = 29^д,53$$

(точнее, $S = 29,5306$ суток $= 29^д 12^ч 44^м$). Такова средняя продолжительность синодического месяца, истинная длительность которого из-за неравномерного движения Луны и Земли колеблется от $29^д,25$ до $29^д,83$.

Аналогичным образом повторяются все фазы Луны. Следовательно, одинаковые фазы наступают в различных точках лунной орбиты и поочередно во всех зодиакальных созвездиях. Этим и объясняется, почему на протяжении года условия видимости Луны в одной и той же фазе резко различны. Зимой, когда Солнце проходит по южным (летним) зодиакальным созвездиям и его суточный путь над горизонтом низок и короток, полная Луна перемещается по северным (зимним) зодиакальным созвездиям, высоко поднимается и подолгу находится над горизонтом. Летом — картина противоположная: полная Луна повторяет зимний суточный путь Солнца и иногда даже бывает не видна, скрываясь за неровным рельефом местности.

Из-за совпадения периодов вращения и обращения Луны продолжительность ее солнечных суток равна синодическому месяцу, так что на Луне 14,8 земных суток длится день и столько же ночь.

СОЛНЕЧНЫЕ ЗАТМЕНИЯ

В своем движении Луна заслоняет (покрывает) звезды зодиакальных созвездий, по которым проходит лунный путь. Значительно реже происходят покрытия Луной планет, оказавшихся на небе в непосредственной близости к лунному пути. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце — такие явления называются солнечными затмениями.

Солнечные затмения бывают только при новолуниях, когда Луна проходит между Солнцем и Землей, но далеко не всегда, поскольку Луна может отходить от эклиптики на 5°09′, а диаметры солнечного и лунного дисков близки к 0°,5. Условия наступления солнечных затмений мы рассмотрим позже. Сначала выясним, почему солнечные затмения видны не со всего дневного полушария Земли.

Линейный диаметр Луны в 400 раз меньше солнечного, поэтому, освещаемая Солнцем, она отбрасывает в пространство сходящийся конус тени и окружающий его расходящийся конус полутени (рис. 63). Когда эти конусы пересекаются с земной поверхностью, на ней происходят солнечные затмения. Из мест земной поверхности, оказавшейся в лунной тени (*А*, см. рис. 63), видно полное солнечное затмение — там Солнце полностью закрыто Луной. В это же время в местах, расположенных в лунной полутени (*В* и *С*, см. рис. 63), происходит частное солнечное затмение: из южной зоны (*С*) полутени видна закрытой северная (верхняя) часть солнечного диска, а из северной зоны (*В*) — южная (нижняя) его часть. Фаза (Ф) солнечного затмения измеряется отношением закрытой части (*d*) диаметра солнечного диска (рис. 64) ко всему его диаметру ($d_\odot$):

$$\Phi = \frac{d}{d_\odot},$$

а вычисляется по радиусам лунного ($\rho_☾$), солнечного ($\rho_\odot$) дисков и видимому угловому расстоянию (β) между их центрами (рис. 65).

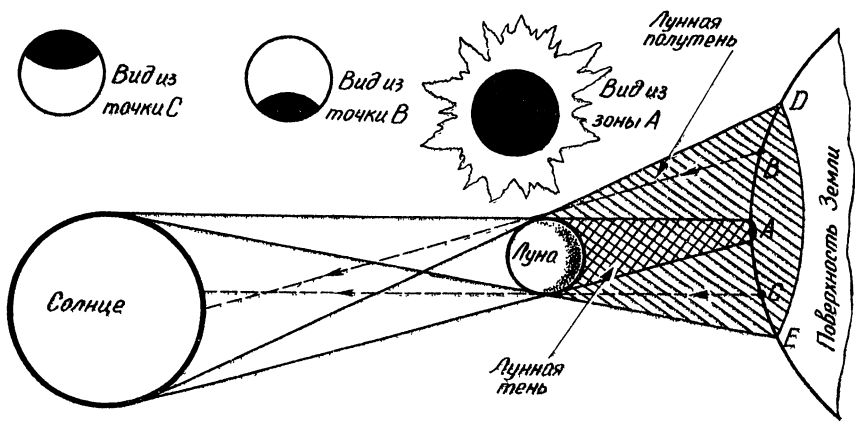


Рис. 63. Схема полного солнечного затмения.

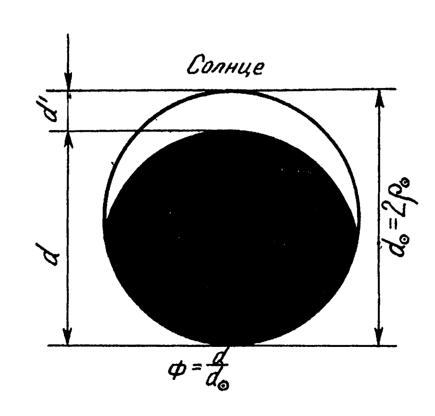


Рис. 64. Частная фаза солнечного затмения.

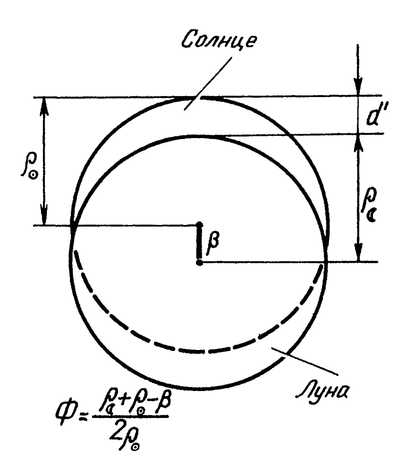


Рис. 65. К расчету фазы солнечного затмения.

Поскольку $d_{\odot}=2\rho_{\odot}$, а $d'=\rho_{\odot}+\beta-\rho_{☾}$, то $d=2\rho_{\odot}-d'=\rho_{\odot}+\rho_{☾}-\beta$ и фаза солнечного затмения

$$\Phi=\frac{\rho_{\odot}+\rho_{☾}-\beta}{2\rho_{\odot}}. \tag{5.1}$$

В зоне лунной полутени, где происходит частное солнечное затмение, $\rho_{☾}<\rho_{\odot}+\beta$ (см. рис. 65) и тогда $\rho_{☾}+\rho_{\odot}-\beta<2\rho_{\odot}$, т. е. фаза затмения $\Phi<1$. Она уменьшается в направлении к внешней границе зоны (*DE*, см. рис. 63), на которой происходит внешнее касание дисков, $\beta=\rho_{☾}+\rho_{\odot}$ и $\Phi=0$. За этой границей затмения вообще не происходит. Следовательно, солнечные затмения принадлежат к оптическим явлениям.

Лунная тень и полутень на земной поверхности имеют вид овальных пятен. Из-за движения Луны с запада к востоку ее тень и полутень быстро мчатся по земной поверхности примерно в том же направлении, уклоняясь либо к северу, либо к югу[1]. Путь лунной тени на ней образует полосу, называемую полосой полной фазы, посредине которой проходит линия центрального затмения (рис. 66). С линии центрального затмения видно симметричное покрытие солнечного диска лунным, так что в середине затмения центры обоих дисков совпадают, их взаимное расстояние $\beta=0$ и, согласно формуле (5.1), наибольшая полная фаза затмения

$$\Phi_m=\frac{\rho_{☾}+\rho_{\odot}}{2\rho_{\odot}}=\frac{1}{2}\left(\frac{\rho_{☾}}{\rho_{\odot}}+1\right), \tag{5.2}$$

а продолжительность полной фазы зависит от соотношения радиусов дисков. При $\rho_{\odot}=\rho_{☾}$ даже наибольшая $\Phi_m=1$ и длится одно мгновение. При самых же благоприятных условиях, когда $\rho_{☾}=16\rlap{.}'8$ (Луна в перигее) и $\rho_{\odot}=15\rlap{.}'8$ (Земля

---

[1] Вспомним, что лунный путь наклонен к экватору на угол, доходящий почти до 29° (см. с.108).

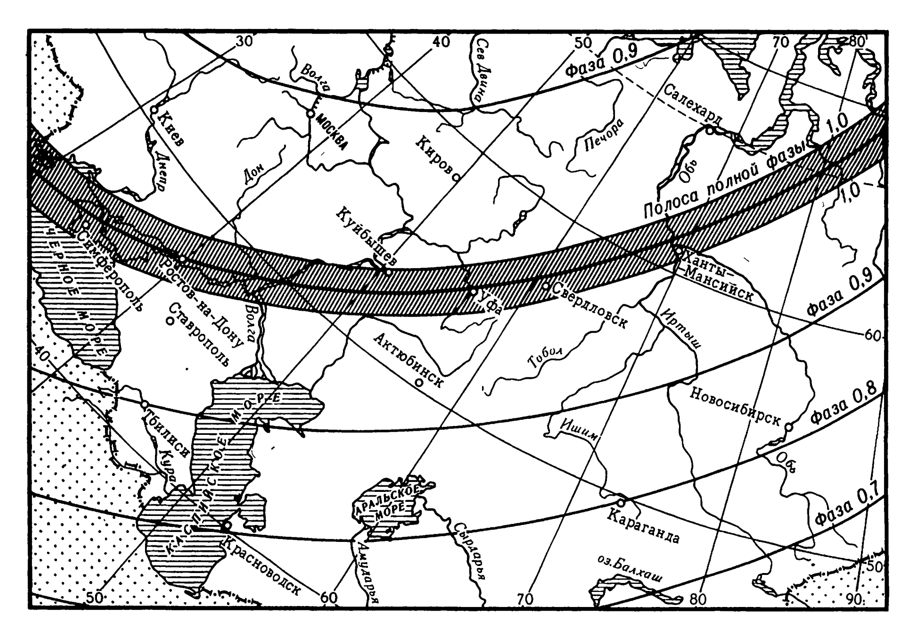


Рис. 66. Полоса полной фазы и линия центрального затмения 15 февраля 1961 г.

в афелии), что возможно только в самом конце июня и в начале июля, $\rho_{☾} / \rho_{\odot} = 1{,}06$, наибольшая фаза полного затмения $\Phi_m = 1{,}03$, а само полное затмение длится не более 7,5 мин.

На границах полосы полной фазы хорошо заметно параллактическое смещение Луны. Поэтому покрытие ею Солнца происходит асимметрично с внутренним касанием их дисков, при котором $\beta = \rho_{☾} - \rho_{\odot}$; полное затмение длится одно мгновение, а его наибольшая фаза

$$\Phi_m = \frac{\rho_{☾} + \rho_{\odot} - \rho_{☾} + \rho_{\odot}}{2\rho_{\odot}} = 1.$$

Ширина полосы полной фазы, равная поперечнику лунной тени, зависит от взаимных расстояний Луны, Земли и Солнца во время затмения. Из-за периодического изменения этих расстояний конус лунной тени может иметь длину от 367 000 до 379 700 км. Поэтому даже при наименьшем геоцентрическом расстоянии Луны в 356 410 км (Луна в перигее) и наибольшем диаметре ее диска (33',5) поперечник лунной тени на земной поверхности не превышает 270 км. При этих же условиях диаметр лунной полутени близок к 6750 км и, следовательно, частное солнечное затмение видно к югу и к северу от полосы полной фазы до расстояния около 3240 км, так как (6750 км — 270 км) : 2 = 3240 км.

Но уже при средних расстояниях Луны от Земли (384 400 км) и Земли от Солнца лунный диск (диаметр 31',1) меньше солнечного (32',0), а конус лунной тени имеет длину около 373 300 км и не доходит до земной поверхности примерно на 4700 км (рис. 67). Поэтому Луна не закрывает Солнца полностью, и вместо полного происходит кольцеобразное затмение: из области *А*

вокруг темного лунного диска видно узкое яркое кольцо незакрытой солнечной поверхности. Наибольшая фаза кольцеобразного затмения тоже определяется по формуле (5.2), и так как $\rho_☾ < \rho_\odot$, то $\Phi_m < 1$. Но даже при наименьшем $\rho_☾ = 14',7$ (Луна в апогее) и наибольшем $\rho_\odot = 16',3$ (Земля в перигелии), что возможно только в самом конце декабря и начале января, кольцеобразная фаза затмения не может быть меньше

$$\Phi = \frac{1}{2}\left(\frac{14',7}{16',3} + 1\right) = 0{,}95.$$

Полоса на земной поверхности, из которой видно кольцеобразное затмение, называется полосой кольцеобразной фазы, по обе стороны которой происходит частное затмение.

Солнечное затмение начинается с правого, западного края Солнца, на диске которого появляется небольшой ущерб, имеющий форму окружности того же радиуса. Постепенно фаза затмения увеличивается и солнечный диск принимает вид непрерывно суживающегося серпа (рис. 68). Если затмение частное, то в середине затмения его фаза достигает некоторого наибольшего значения $\Phi_m < 1$, а затем снова уменьшается. Затмение оканчивается на левом, восточном краю солнечного диска. При частных затмениях ослабление солнечного света не заметно (за исключением затмений с наибольшей фазой, близкой к 1), и сами фазы частного солнечного затмения видны лишь при наблюдениях сквозь темный светофильтр.

В полосе полной фазы солнечное затмение тоже начинается с частных фаз, но, когда Луна полностью закроет Солнце, наступает полумрак, как в темные сумерки, и на потемневшем небе появляются самые яркие звезды и планеты, а вокруг Солнца видно красивое лучистое сияние жемчужного цвета — солнечная корона, представляющая собой внешние слои солнечной атмосферы, невидимые вне затмения из-за их небольшой яркости в сравнении с яркостью дневного неба (рис. 69). Вскоре, чаще всего через 2—3 мин, Луна открывает западный солнечный край, полная фаза затмения оканчивается, быстро светлеет, исчезают звезды, планеты и солнечная корона.

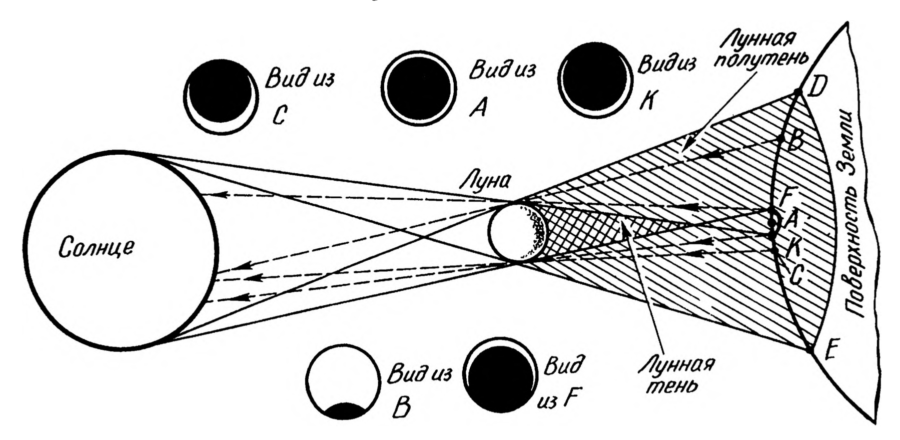


Рис. 67. Схема кольцеобразного солнечного затмения.



Рис. 68. Последовательность фаз частного солнечного затмения.

Продолжительность всего затмения и его полной фазы бывает различной и подсчитывается по диаметрам лунной полутени и тени, а также по скорости их перемещения по земной поверхности.

Наибольшая продолжительность полной фазы затмения при максимальном диаметре лунной тени $D = 270$ км возможна лишь в экваториальной зоне Земли, где линейная скорость точек земной поверхности $v = 0{,}47$ км/с. Приняв скорость Луны $v_{☾} = 1{,}08$ км/с, найдем для полной фазы продолжительность

$$t = \frac{D}{v_{☾} - v}, \qquad t = \frac{270 \text{ км}}{1{,}08 \text{ км/с} - 0{,}47 \text{ км/с}} = 443^{с} = 7^{м}23^{с},$$

что недалеко от истины ($7^{м}31^{с}$). Но условия для таких продолжительных полных затмений наступают крайне редко. На протяжении полутора тысяч лет, с VII до начала XXIII столетия, не было и не будет ни одного такого затмения. Но с несколько меньшей продолжительностью полные солнечные затмения в XX столетии были 8 июня 1937 г., длившееся $7^{м}04^{с}$ (полоса полной

фазы проходила по Тихому океану, Южной и Центральной Америке), 20 июня 1955 г. длительностью в $7^{м}08^{с}$ (полоса шла по Индийскому океану, Филиппинским островам и Тихому океану) и 30 июня 1973 г. в Центральной Африке, продолжавшееся в Нигере $7^{м}10^{с}$. Ближайшее полное солнечное затмение продолжительностью в $7^{м}29^{с}$ произойдет лишь 16 июля 2186 г.

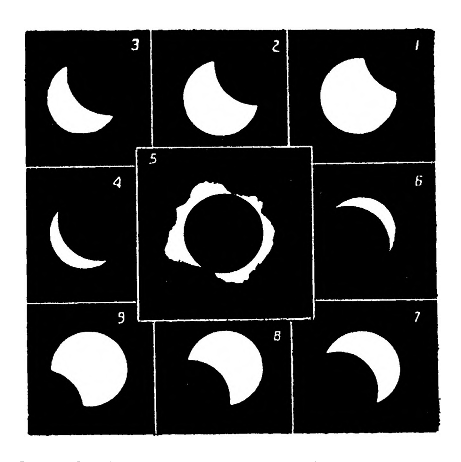


Рис. 69. Последовательность фаз полного солнечного затмения.

Аналогично можно подсчитать, что в исключительных случаях наибольшая продолжительность кольцеобразной фазы солнечного затмения достигает $12^{м}20^{с}$, а частного затмения — до 3,5 ч. Но подавляющее большинство затмений длится до 2,5 ч, а их полная или кольцеобразная фаза всего лишь 2—3 мин.

С момента вступления лунной тени на нашу планету до момента схода тени с нее проходит от одного до трех с половиной часов, за которые лунная тень пробегает путь от 6000 до 12 000 км, и поэтому в разных местах земной поверхности затмение происходит в различные моменты времени. Оно начинается в западных районах при восходе Солнца и заканчивается на востоке при его заходе. Общая продолжительность частного солнечного затмения на Земле может достигать 6 ч.

Теперь рассмотрим условия наступления и периодичность солнечных затмений. Представим себе на небе эклиптику, пересекающийся с нею в лунных узлах (☊ и ☋) лунный путь и положения Солнца и Луны в различные новолуния (рис. 70). При новолуниях, происходящих вдали от лунных узлов (новолуния *1*, *7*, *8*, *13*), солнечные затмения невозможны — Луна проходит на небе ниже (южнее) или выше (севернее) Солнца. И только при новолуниях вблизи лунных узлов наступают частные (новолуния *3*, *5*, *10*, *12*) и полные или кольцеобразные (новолуния *4*, *11*) солнечные затмения. Чтобы произошло частное затмение,

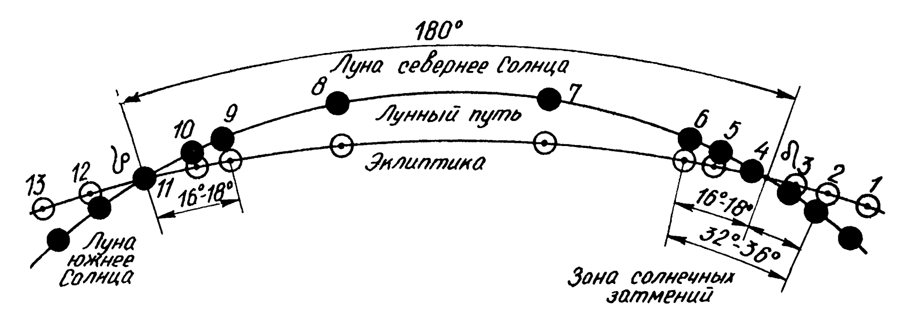


Рис. 70. Условия наступления солнечных затмений.

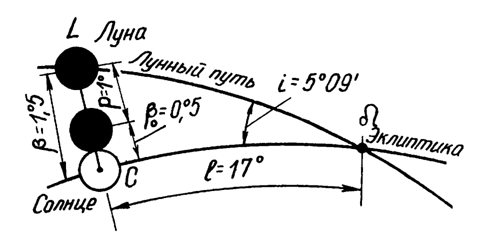


Рис. 71. Истинное положение Луны (L) при видимом касании ее диска с солнечным (C).

необходимо видимое касание солнечного и лунного дисков (новолуния *2*, *6*, *9*), диаметры которых близки к 0°5, и, следовательно, угловое расстояние между центрами дисков $\beta_0 = 0°,5$ (рис. 71). Но вспомним, что параллактическое смещение Луны может достигать $p = 1°$, поэтому из ряда мест земной поверхности касание дисков будет видно даже при истинном расстоянии $\beta = 0°,5 + 1° = 1°,5$. Закройте левый глаз, возьмите в руку монету и расположите ее вертикально перед собой так, чтобы правый глаз видел касание ее левого края какого-либо предмета, стоящего за монетой. Зажмурив правый глаз и посмотрев на монету левым глазом, вы хорошо увидите параллактическое смещение монеты: ее край теперь не будет в видимом соприкосновении с предметом. Аналогичная картина происходит в видимом положении Луны при ее наблюдении из различных мест земной поверхности.

Из прямоугольного сферического треугольника $LC☊$ вычислим по формуле[1] (1.12) угловое расстояние l Солнца от лунного узла☊:

$$\sin l = \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{ctg} i = \operatorname{tg} 1°30' \cdot \operatorname{ctg} 5°09' = 0{,}0262 \cdot 11{,}095 = 0{,}2906,$$

откуда $l = 16°,9 \approx 17°$.

Такие же подсчеты для наибольших и наименьших диаметров дисков обоих светил дают, соответственно, $l = 18°$ и $l = 16°$. Следовательно, частные солнечные затмения могут произойти при новолуниях, наступающих не далее 18° от лунных узлов, а при расстояниях менее 16° солнечные затмения происходят обязательно.

При полных и кольцеобразных солнечных затмениях истинное расстояние между центрами дисков светил определяется только параллаксом Луны $p = \beta = 1°$, так как видимые центры дисков совпадают. Тогда при наименьших диаметрах дисков получается $l = 10°$, а при наибольших диаметрах $l = 11°,5$. Значит, эти затмения происходят в новолуния, наступающие не далее 11°,5 от лунных узлов, и чем ближе к узлу происходит затмение, тем больше его фаза и продолжительность.

Бытует мнение, что солнечные затмения происходят очень редко, но в действительности это не так. В самом деле, дуга эклиптики, в пределах которой происходят солнечные затмения и которая поэтому называется зоной солнечных затмений (см. рис. 70), имеет протяженность в 32—36° (по 16—18° в обе стороны от лунного узла). Солнце, ежесуточно смещаясь по эклиптике на $\omega_\odot = 1°$, проходит эту зону за 32—36 суток, на протяжении которых обязательно наступает хотя бы одно новолуние, а иногда — два (вблизи краев зоны), так как они чередуются через синодический месяц $S = 29{,}53$ суток. Следовательно, в зоне затмений у каждого лунного узла обязательно происходит одно солнеч-

[1] См. с. 31.

ное затмение разного вида, а иногда и по два частных затмения с небольшой фазой.

Зоны солнечных затмений диаметрально противоположны, и Солнце, выйдя из одного лунного узла, должно подойти к другому ровно через полгода (183 дня). Но из-за отступления лунных узлов (см. с. 108) сами зоны затмений за полгода смещаются навстречу Солнцу почти на 10°, а Луна движется в прямом направлении и поэтому солнечные затмения происходят на 5 дней раньше, т. е. через 178 суток. Если два частных солнечных затмения произошли в первых числах января и февраля, то очередная пара частных затмений может наступить в двадцатых числах июня и июля, а из следующей пары — только первое произойдет в середине декабря, а второе придется уже на середину января следующего года. Таким образом, ежегодно происходят обязательно два солнечных затмения любого вида, а в очень редкие годы — до пяти частных затмений с малыми фазами. Такой редкий случай произошел в 1935 г. и до 2206 г. больше не повторится. Но четыре солнечных затмения будут в 1982, 2000, 2011, 2029, 2047 гг. Чаще всего бывает по 2—3 солнечных затмения в год, причем одно из них, как правило, полное или кольцеобразное.

Но так как в разные годы лунная тень пробегает по различным местам земной поверхности, то в каждом месте полные солнечные затмения происходят крайне редко, хотя бывают и исключения. Так, например, в Москве полные солнечные затмения были 11 августа 1124 г.[1], 20 марта 1140 г. (т. е. через 16 лет), 7 июня 1415 г. (через 275 лет), 25 февраля 1476 г. (через 61 год) и в ее окрестностях — 19 августа 1887 г. (через 411 лет). Очередное полное затмение Солнца в Москве продолжительностью около 7 мин произойдет 16 октября 2126 г. В Жданове и Ейске полные солнечные затмения наблюдались 30 июня 1954 г. и 15 февраля 1961 г., т. е. менее чем через 7 лет.

Ближайшее полное солнечное затмение, видимое на территории Советского Союза, произойдет 31 июля 1981 г. Полоса полной фазы пройдет по Грузии и Северному Кавказу к Каспийскому морю, далее по Казахстану, Забайкалью и Дальнему Востоку к острову Сахалин. Ширина полосы полной фазы не будет превышать 108 км, наибольшая фаза $\Phi_m = 1{,}01$, а ее продолжительность — не более 120 с.

ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

В отличие от солнечных лунные затмения представляют собой физическое явление прохождения Луны сквозь земную тень, имеющую, как и у Луны, форму сходящегося круглого конуса, окруженного расходящейся полутенью (рис. 72). В зависимости от гелиоцентрического расстояния Земли длина ее тени может быть различной — от 1360 тыс. км (Земля в перигелии) до 1407 тыс. км (Земля в афелии), а при среднем расстоянии близка к 1383 тыс. км, т. е. всегда больше геоцентрического расстояния Луны. Ось земной тени лежит в плоскости земной орбиты, и поэтому тень и полутень проецируются на небо в виде концентрических кругов, центр которых находится на эклиптике в точке, противоположной Солнцу. Следовательно, чтобы произошло лунное затмение, Луна должна противостоять Солнцу, т. е. быть в фазе полнолуния. Но на сред-

[1] Даты даются по современному календарю.

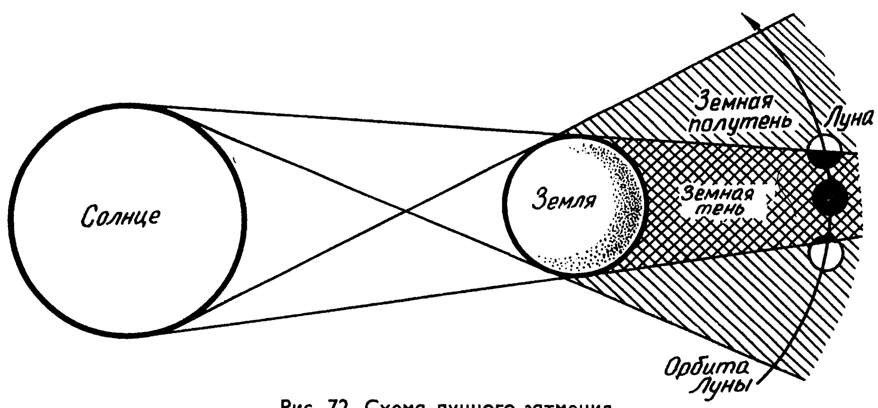


Рис. 72. Схема лунного затмения.

нем расстоянии Луны от Земли (384 400 км) угловой радиус земной тени $\rho_☾ = 42'$, при наименьшем расстоянии $\rho_☾ = 47'$, а при наибольшем $\rho_☾ = 38'$. Луна же отходит от эклиптики на угловое расстояние до 5°09'. Поэтому далеко не при всех полнолуниях, наступающих в разных точках лунного пути, Луна попадает в земную тень, а проходит либо ниже (южнее), либо выше (севернее) ее (полнолуния *1*, *6*, *7*, рис. 73). Если полнолуния наступают вблизи лунных узлов, то Луна частично (полнолуния *4*, *10*, рис. 73) или полностью (полнолуния *3*, *9*, рис. 73) погружается в земную тень — происходят частные и полные лунные затмения.

Перед погружением в земную тень Луна проходит сквозь полутень Земли, но ослабление лунного света при этом настолько ничтожно, что может быть обнаружено лишь точной аппаратурой.

Участок эклиптики, на котором происходят теневые лунные затмения, называется зоной лунных затмений. Ее границы определяются внешним касанием Луны с земной тенью (см. рис. 73, полнолуния *2*, *5*, *8*, *11*). Положение этих границ относительно лунного узла вычисляют по той же формуле (1.12)

$$\sin l = \mathrm{tg}\,\beta \cdot \mathrm{ctg}\,i,$$

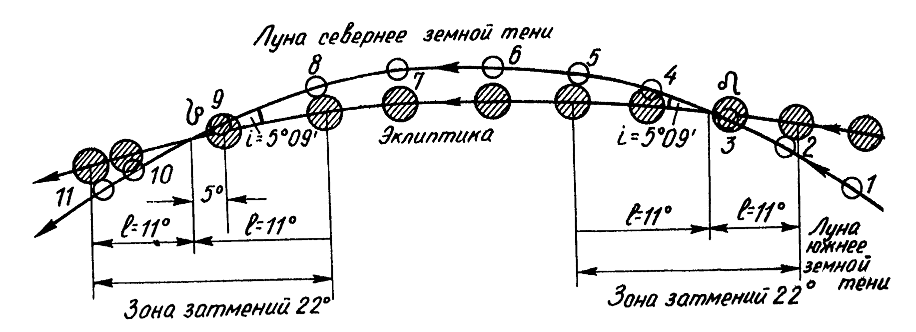


Рис. 73. Условия наступления лунных затмений.

в которой угловое расстояние β между центрами лунного диска (его радиус $\rho_{☾}$) и земной тени определяется как

$$\beta = \rho_{\bullet} + \rho_{☾}.$$

Здесь уже не нужно учитывать параллакса Луны, так как она и падающая на нее область земной тени находятся на одинаковом геоцентрическом расстоянии.

При средних значениях радиуса земной тени $\rho_{\bullet} = 42'$ и радиуса лунного диска $\rho_{☾} = 16'$ границы зоны частных затмений отстоят от лунного узла на $l = 11°$, а при крайних значениях смещаются в ту или иную сторону на 1°. Полные лунные затмения, наступающие при $\beta = \rho_{\bullet} - \rho_{☾}$, могут происходить не далее чем в 4°,5—5°,5 от лунного узла.

Чем ближе к лунному узлу происходит лунное затмение, тем больше его фаза, определяемая долей (d) лунного диаметра ($d_{☾}$), покрытой земной тенью, и аналогично фазе солнечного затмения (см. 5.1) вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{\rho_{\bullet} + \rho_{☾} - \beta}{2\rho_{☾}}.$$

Смещаясь с запада к востоку, Луна входит в земную тень своим левым краем и им же выходит из тени. При частном лунном затмении (рис. 74) его фаза постепенно возрастает до некоторого наибольшего значения $\Phi_m < 1$, зависящего от степени погружения Луны в земную тень, а затем снова уменьшается.

Рис. 74. Путь Луны сквозь земную тень при частном лунном затмении.

Полному лунному затмению предшествуют частные фазы. В момент полного погружения Луны в земную тень (рис. 75) наступает полное затмение ($\Phi = 1$), в ходе которого фаза увеличивается до наибольшего значения $\Phi_m > 1$ (середина затмения), а затем убывает и к началу выхода Луны из тени снова становится равной единице. Далее идут частные фазы, постепенно уменьшающиеся до нуля.

Наибольшая фаза Φ_m полного лунного затмения зависит от глубины погружения Луны в земную тень. Если погружение незначительное, то она немногим более единицы.

В редких же случаях, когда центр земной тени совпадает с лунным узлом, Луна проходит сквозь тень по ее диаметру[1], в середине затмения

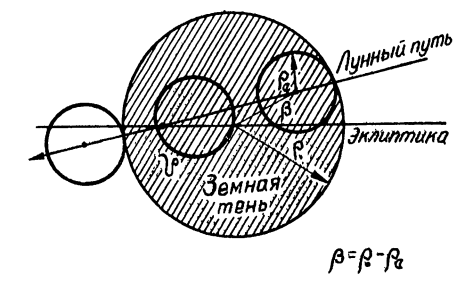


Рис. 75. Путь Луны сквозь земную тень при полном лунном затмении (полутень Земли не показана).

[1] Такие затмения называются центральными.

$\beta = 0$, и наибольшая фаза

$$\Phi_m = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho_\odot}{\rho_☾} + 1\right).$$

Поскольку минимальное значение $\frac{\rho_\odot}{\rho_☾} = 2{,}6$ (Луна в апогее, Земля в перигелии), а максимальное значение $\frac{\rho_\odot}{\rho_☾} = 2{,}8$ (Луна в перигее, Земля в афелии), то наибольшая фаза центрального затмения может быть от $\Phi_m = 1{,}80$ до $\Phi_m = 1{,}90$.

Коль скоро Луна реально погружается в земную тень, лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли, где Луна находится над горизонтом, и начинаются (или оканчиваются) лунные затмения одновременно в какой-либо определенной системе счета времени (например, по гринвичскому или московскому времени).

Продолжительность лунных затмений зависит от их условий. Частное затмение с небольшими фазами продолжается несколько минут. Полное затмение с наибольшей фазой $\Phi_m = 1$ (касательное затмение при $\beta = r_\odot - r_☾$) длится одно мгновение.

Центральное полное затмение может продолжаться почти 2 ч, а вместе с частными фазами — до 3,8 ч.

В полном затмении Луна приобретает бурый, темно-красный, а иногда и красно-кирпичный цвет, который объясняется тем, что солнечный свет, преломляясь в земной атмосфере, все же попадает на Луну. Но так как красные лучи проходят сквозь атмосферу с меньшим преломлением, чем голубые и синие (к тому же значительно рассеиваемые атмосферой), то они преимущественно и достигают лунной поверхности, окрашивая ее в соответствующий цвет. Однако бывают и такие полные лунные затмения, во время которых Луна еле просматривается в земной тени.

Часто ли происходят лунные затмения? Как мы видели, лунные затмения происходят только в полнолуния, наступающие не далее 10—12° от лунных узлов, т. е. в зоне протяженностью в среднем около 22° (см. рис. 73), причем в это время Луна перемещается вблизи одного узла, а Солнце — вблизи другого, диаметрально противоположного. Смещаясь по эклиптике ежесуточно на 1°, Солнце проходит зону затмений за 22—23 суток, на протяжении которых может наступить только одно полнолуние, а может быть и ни одного, так как они повторяются через синодический месяц $S = 29^{д},53$. Следовательно, в каждой зоне возможно не более одного лунного затмения (полного или частного), а порой их и совсем не бывает. Обе зоны лунных затмений Луна проходит ежемесячно, Солнце же поочередно вступает в каждую зону примерно через 177 суток. Поэтому лунные затмения могут повторяться через 177—178 суток. Таким образом, как правило, на протяжении года происходит одно-два лунных затмения, в некоторые годы их может и не быть, а иногда бывает три затмения, если первое произошло в самом начале года.

Ближайшие полные лунные затмения, видимые в СССР, произойдут 9 января и 30 декабря 1982 г.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ И ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

На протяжении одного календарного года происходит от 2 до 5 солнечных и от 0 до 3 лунных затмений и, казалось бы, наибольшее число затмений в году равно 8. Однако здесь, образно говоря, «арифметика нарушается». Вспомним, что пятое солнечное и третье лунное затмение в году происходит из-за смещения лунных узлов навстречу Солнцу и Луне, и поэтому лишь одно из них может произойти в конце текущего календарного года, а второе придется уже на начало следующего. Таким образом, наибольшее число затмений в одном календарном году не превышает семи: либо 5 частных солнечных и 2 полных лунных, либо 4 частных солнечных и 3 полных лунных затмения. Однако такие сочетания крайне редки, и обычно на протяжении года происходит 2—3 солнечных и 1—2 лунных затмения, т. е. первые бывают примерно в полтора раза чаще вторых. Тем не менее лунные затмения наблюдаются значительно чаще потому, что они видны со всего ночного полушария Земли, в то время как солнечные только из области лунной тени и полутени.

Солнечные и лунные затмения неизбежно повторяются, так как их наступление зависит от трех периодов. Во-первых, новолуния и полнолуния повторяются через синодический месяц $S = 29{,}53$ суток. Во-вторых, из-за отступления лунных узлов на 19° в год Солнце, выйдя из одного лунного узла, снова к нему возвращается через период $T_{☊} = 346$ суткам, называемый драконическим годом (точнее, $T_{☊} = 346^{д}{,}62$). Наконец, по той же причине Луна возвращается к тому же узлу через драконический месяц $S_{☊} = 27^{д}{,}21$. Легко подсчитать, что

$$\begin{aligned} 223S &= 223 \cdot 29^{д}{,}53 = 6585^{д}{,}32,\\ 242S_{☊} &= 242 \cdot 27^{д}{,}21 = 6585^{д}{,}35,\\ 19\,T_{☊} &= 19 \cdot 346^{д}{,}62 = 6585^{д}{,}78. \end{aligned}$$

Следовательно, каждое затмение повторяется через период в 6585 суток = = 18 лет 11 дней (или 10 дней, если в этом периоде содержалось пять високосных лет), называемый саросом, на протяжении которого происходит 70 затмений, в том числе 42 солнечных и 28 лунных. Однако по истечении сароса каждое затмение повторяется в несколько иных условиях, так как он не содержит целого числа суток. За избыток около 1/3 суток (сверх 6585 дней) Земля повернется вокруг оси примерно на 120°, поэтому лунная тень пробежит по земной поверхности примерно в 120° западнее, чем 18 лет назад, да и Солнце с Луной будут на несколько иных расстояниях от лунного узла. Этим и объясняется, что последовательность затмений очень медленно, но все же постепенно нарушается. В настоящее время вычислены даты предстоящих затмений вплоть до 3000 г.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛУНЫ НА ЗЕМЛЮ

Одно из таких воздействий, сводящееся к небольшим уклонениям Земли от эллиптической орбиты, уже рассмотрено при описании движения Луны. Второе существенное воздействие Луны вызывает приливы в открытых водных бассейнах, в атмосфере и даже в земной коре. Непосредственно заметны лишь морские приливы в морях и океанах, состоящие в периодическом повышении и снижении уровня воды. Во время приливов уровень воды плавно нарастает, достигает наибольшего значения, а затем постепенно снижается до прежнего

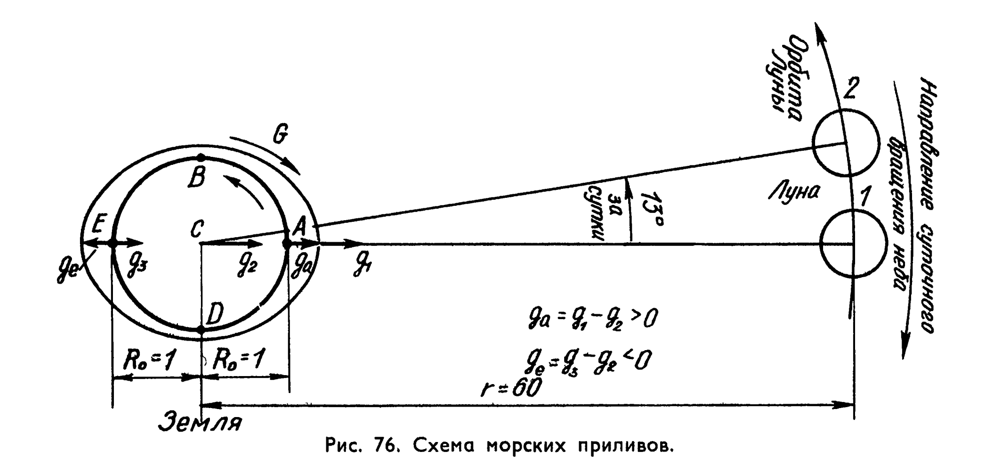


Рис. 76. Схема морских приливов.

наинизшего состояния. Максимумы приливов чередуются через определенные промежутки времени, близкие к $12^ч26^м$. Но если вспомнить, что ежесуточное запаздывание восхода Луны составляет в среднем $52^м$ и поэтому между моментами ее верхней и нижней кульминации протекает тоже около $12^ч26^м$, то сразу станет очевидной связь между видимым положением Луны и морскими приливами.

Изобразим Землю, покрытой водной оболочкой, в действительности значительно более тонкой, чем это ради наглядности показано на схеме (рис. 76). Обозначим массу Луны через M, примем радиус Земли за единицу ($R_0 = 1$), и тогда среднее геоцентрическое расстояние Луны, выраженное в земных радиусах, близко к $r = 60$.

Согласно закону всемирного тяготения, Луна, находясь в положении *1*, сообщает гравитационные ускорения[1]

$$g_1 = \frac{GM}{(r-1)^2} = \frac{GM}{59^2}$$

— воде в местности A, где Луна находится в верхней кульминации;

$$g_2 = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{60^2}$$

— центру Земли C;

$$g_3 = \frac{GM}{(r+1)^2} = \frac{GM}{61^2}$$

— воде в местности E, где Луна находится в нижней кульминации.

Следовательно, $g_1 > g_2 > g_3$, и поэтому возникает разность ускорений, называемая возмущающим или приливным ускорением. В местности A возмущающее ускорение относительно центра Земли

$$g_a = g_1 - g_2 = GM\left[\frac{1}{(r-1)^2} - \frac{1}{r^2}\right] = GM\frac{2r-1}{r^2(r-1)^2}.$$

[1] См. формулу (4.23) на с. 98.

Пренебрегая в предыдущем равенстве единицей в сравнении с r, окончательно найдем:

$$g_a = \frac{2GM}{r^3}, \qquad (5.3)$$

т. е. возмущающее ускорение обратно пропорционально кубу расстояния.

В местности A приливное ускорение

$$g_a = g_1 - g_2 > 0$$

направлено в сторону Луны, а в местности E приливное ускорение

$$g_e = g_3 - g_2 < 0,$$

т. е. направлено противоположно, но оба они устремлены от центра Земли и поэтому слегка ослабляют силу тяжести на земной поверхности. Из-за этого водная оболочка Земли немного деформируется, принимая форму, близкую к эллипсоиду: в местах, обращенных к Луне и от нее, уровень воды несколько повышается, т. е. наступают приливы, а в местах, где Луна находится вблизи горизонта (точки B и D, см. рис. 76), уровень воды спадает — происходят отливы.

Водная оболочка вращается вместе с Землей с запада к востоку (по стрелке, см. рис. 76), а приливы и отливы, представляющие собой колебания уровня воды, все время следуют за Луной в суточном вращении неба с востока к западу (по стрелке G, см. рис. 76), образуя две приливные волны. Каждая волна обегает Землю в среднем за $24^{ч}52^{м}$, т. е. за промежуток времени между одноименными кульминациями Луны. Поэтому приливы чередуются примерно через $12^{ч}26^{м}$, а между ними наступают отливы.

Амплитуда приливной волны, т. е. разность уровней воды в приливах и отливах, зависит от протяженности водного бассейна, рельефа дна и берегов, периодически изменяющегося расстояния Луны, ее высоты в кульминациях и других причин, в частности от приливообразующего действия Солнца, которое тоже вызывает приливы на Земле. Масса Солнца почти в $27 \cdot 10^6$ раз превышает массу Луны, но оно удалено от Земли в 389 раз дальше нашего спутника, и поэтому, согласно формуле (5.3), приливное действие Солнца слабее лунного в

$$\frac{389^3}{27 \cdot 10^6} = \frac{58{,}9 \cdot 10^6}{27 \cdot 10^6} \approx 2{,}2 \text{ раза.}$$

Во время новолуний и полнолуний действия Луны и Солнца складываются, и амплитуда приливов возрастает. Во время лунных квадратур их действия противоположны и приливы, вызываемые Луной, совпадают с отливами, вызываемыми Солнцем, в результате чего не только уменьшается высота приливов, но и задерживается спад воды при отливах.

Во внутренних морях, отделенных от океанов, амплитуда приливов невелика, всего лишь несколько сантиметров. В открытых океанах приливы тоже небольшие, до 1—2 м. Зато в соединяющихся с океанами открытых морях и в узких бухтах приливы очень велики. Так, в Баренцевом море у Мурманского берега приливы достигают высоты 6 м, а в Гижигинской губе Охотского моря доходят до 11 м. Наибольшие приливы высотой до 16 м наблюдаются в заливе Ноэль, на восточном берегу Канады.

Сложность приливных явлений состоит еще и в том, что в действительности их максимумы не совпадают по времени с кульминациями Луны, а наступают позже их с определенным опозданием в каждом месте от 1,5 до 3 ч. Это объясняется тормозящим действием дна и берегов водных бассейнов, а также временем, требующимся для смещения колоссальной массы воды.

Приливы и отливы в земной коре, которая обладает большой вязкостью, значительно меньше морских. Так, в южных и средних районах СССР они близки к 50 см. Приливные волны, пробегая навстречу вращению Земли, оказывают на нее тормозящее действие, вследствие чего период вращения нашей планеты медленно увеличивается примерно на $0^c,0014$ в столетие и возрастет на 1^c лишь через 71 400 лет.

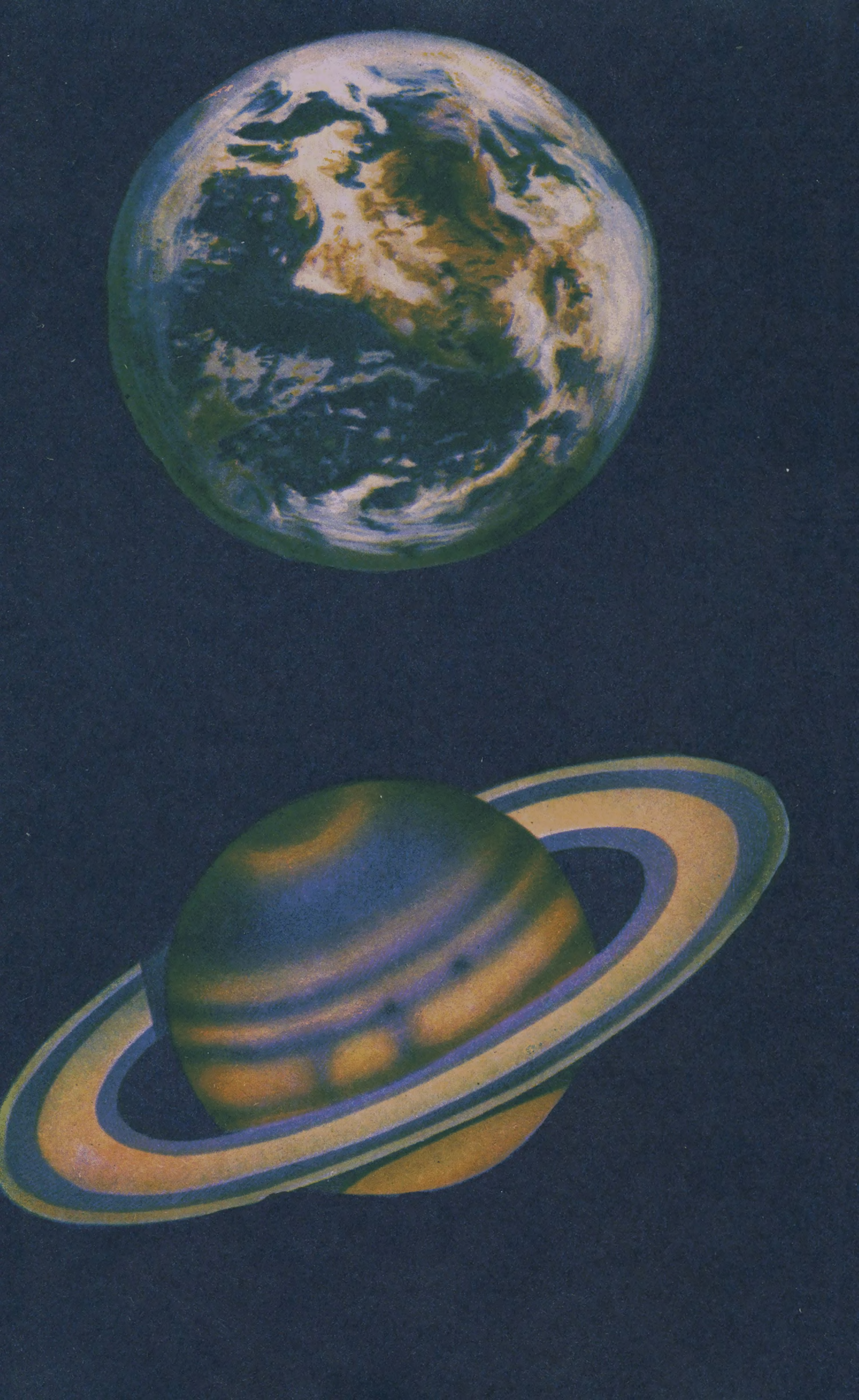
В далеком прошлом Луна вращалась быстрее, чем теперь, но под действием Земли в ее коре перемещалась мощная приливная волна, которая на протяжении сотен миллионов лет тормозила вращение Луны, и в конечном итоге период ее вращения сравнялся с периодом обращения вокруг Земли. Именно поэтому Луна теперь всегда повернута к Земле одним своим полушарием.

Третье, значительное воздействие Луны на Землю легко продемонстировать на простой детской игрушке — обыкновенном волчке (часто называемом также юлой). Приведите волчок в быстрое вращение, а затем легким ударом по его экватору в вертикальном направлении или по оси в горизонтальном направлении попытайтесь его опрокинуть. Вы увидите, что волчок будет продолжать вращаться, но его ось слегка отклонится от вертикали и, сохраняя угол наклона, станет описывать коническую поверхность. Вместе с осью будет поворачиваться при постоянном наклоне и плоскость экватора. Такое движение оси и плоскости экватора вращающегося тела называется прецессионным.

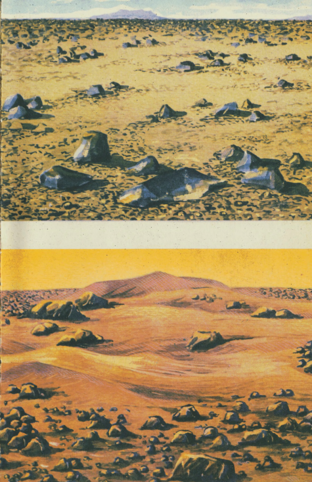
У Земли оно вызывается динамическим воздействием Луны и Солнца на избыток массы вдоль экваториального пояса Земли. Если бы Земля была правильным шаром, то воздействие на нее Луны и Солнца не изменило бы направления оси ее вращения, так как согласно закону всемирного тяготения шаровые тела взаимодействуют друг с другом как две точки с той же массой. Но Земля имеет сфероидальную форму, и ее массивный экваториальный пояс, отличающий фигуру Земли от правильного шара, тоже притягивается Луной и Солнцем. Действие этих тел аналогично, поэтому достаточно рассмотреть только лунное.

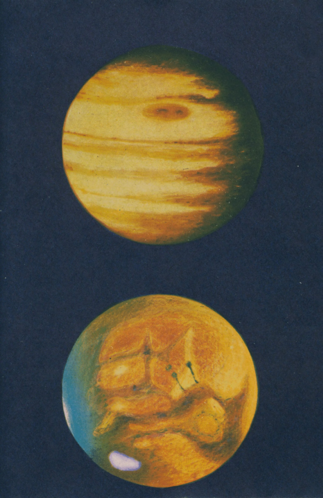
Изобразим меридиональный разрез Земли, внутри его пунктиром покажем контур сферической поверхности, а сплошными прямыми линиями отметим ось вращения Земли (pp'), след плоскости земного (qq') и небесного (QQ') экватора, след плоскости земной орбиты и эклиптики, а также след плоскости лунной орбиты (рис. 77). Продолжение земной оси pp' изображает ось мира, а точки ее пересечения с небесной сферой — полюсы мира (P — северный и P'— южный). Пунктирная прямая $ПП'$ представляет собой перпендикуляр к плоскости земной орбиты, или ось эклиптики, а ее точки $П$ и $П'$ на небесной сфере — полюсы эклиптики, северный ($П$) и южный ($П'$). Плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости земной орбиты и эклиптики под углом $i = 5°,2$, а плоскость земного и небесного экватора пересекается с плоскостью эклиптики под углом $\varepsilon = 23°,5$; на такой же угол $\varepsilon = 23°,5$ ось мира (PP') отклонена от оси эклиптики ($ПП'$) и, следовательно, полюсы мира отстоят от полюсов эклиптики.

1. Вид Земли из космоса (вверху). 2. Вид Сатурна в телескоп (внизу). ⟶



3. Каменистые пустыни на Земле (вверху) и на Марсе (внизу).





Как уже указывалось, гравитационное воздействие Луны на внутреннюю, шаровую зону Земли не вызывает прецессионного движения ее оси. Но Луна притягивает также зоны экваториального пояса, причем более близкую к ней зону ($bq'c$) с большей силой (F_1), чем далекую зону (aqd), т. е. $F_1 > F_2$. Обе эти силы создают относительно центра Земли моменты сил, направленные в противоположные стороны: момент силы F_2 стремится повернуть Землю по вращению часовой стрелки и удалить земную ось от оси эклиптики, а момент силы F_1 действует противоположно, и так как его значение больше, то разность моментов направлена против вращения часовой стрелки и стремится повернуть Землю, приблизив ось ее вращения к оси эклиптики (по стрелке M). Аналогичное воздействие, но в 2,2 раза меньше, оказывает на Землю и Солнце. Благодаря значительной массе и быстрому вращению Земля препятствует такому повороту, но ее ось, а с нею и ось мира, прецессирует, описывая в пространстве коническую поверхность вокруг оси эклиптики, подобно тому как поворачивалась ось вращения волчка. Вершина этой конической поверхности находится в центре Земли. Прецессионное движение земной оси происходит в направлении вращения часовой стрелки, т. е. с востока к западу, на 50'',3 в год, из которых несколько более 34'' вызывается воздействием Луны, а остальные 16'' — воздействием Солнца. Легко подсчитать, что полный оборот вокруг оси эклиптики земная ось завершает за период прецессии

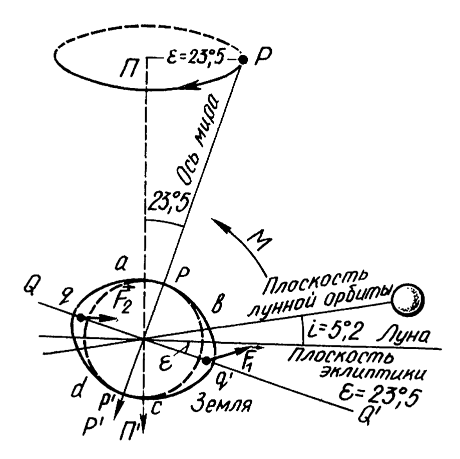


Рис. 77. Прецессионное движение земной оси.

$$T_p = \frac{360°}{50'',3} = \frac{360 \cdot 3600''}{50'',3} = 25\,800 \text{ лет} \approx 26\,000 \text{ лет}.$$

Вместе с осью Земли и осью мира с этим же периодом поворачивается с востока к западу (на 50'',3 в год) плоскость земного и небесного экватора, а следовательно, и линия ее пересечения с плоскостью эклиптики. Но так как на этой линии лежат точки равноденствий, то и они вместе с точками солнцестояний за год смещаются по эклиптике на 50'',3 к западу, навстречу видимому годовому движению Солнца. Именно поэтому Солнце ежегодно проходит точки равноденствий на $20^{м} 24^{с}$ раньше и тропический год короче звездного года (см. с. 35). Отсюда и возник термин «прецессия» — предшествование или предварение, т. е. более раннее наступление равноденствий.

Из-за прецессии полюсы мира медленно с тем же периодом $T_p = 25\,800$ лет перемещаются по небу, описывая вокруг полюсов эклиптики дуги, близкие к окружности радиусом $\varepsilon = 23°,5$.

Три тысячи лет назад северный полюс мира отстоял от теперешней Полярной звезды (α Малой Медведицы) примерно на 16°, а из ярких звезд ближайшей

← 4. **Вид Марса в телескоп (вверху).**

5. **Вид Юпитера с расстояния 2 965 тыс. км. (внизу).**

к нему была звезда β Малой Медведицы (2^m,20). Точка весеннего равноденствия находилась в середине созвездия Овна, а точка осеннего равноденствия — в созвездии Весов, вблизи звезды α Весов. Именно поэтому первую точку обозначили знаком созвездия Овна (♈), а вторую — знаком созвездия Весов (♎). С тех пор обе точки сдвинулись по эклиптике к западу на расстояние около 42°: одна — в созвездие Рыб, а другая — в созвездие Девы, но их обозначения остались прежними.

Сейчас северный полюс мира приближается к Полярной звезде и к середине будущего столетия сблизится с ней до 0°,6, а затем будет удаляться от нее, и к 4000 г. полярной звездой станет γ Цефея, а через 11 500 лет — звезда Вега (α Лиры), к которой северный полюс мира подойдет на расстояние в 4—5°. К этому времени из-за прецессии значительно изменятся экваториальные координаты звезд, а следовательно, и вид звездного неба. Нынешняя Полярная звезда будет отстоять от северного полюса мира примерно на 48° и в средней полосе нашей страны высоко подниматься над горизонтом в верхней кульминации и опускаться почти к самому горизонту в нижней кульминации, как сейчас поднимается и опускается звезда Капелла (α Возничего). Ковш Большой Медведицы в нижней кульминации станет заходить за горизонт, и только «ручка» ковша будет видна из-за него. Созвездие Орла станет незаходящим, созвездие Ориона — невосходящим, а Возничий превратится в экваториальное созвездие. В южных районах страны появится созвездие Южного Креста, ныне видимое лишь в южном полушарии и в тропическом поясе Земли.

ГЛАВА VI

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ПЛАНЕТ

ДВЕ ГРУППЫ ПЛАНЕТ

По своим физическим характеристикам планеты Солнечной системы объединяются в две группы, разграниченные в пространстве поясом астероидов. Планеты, движущиеся внутри этого пояса и потому часто называемые внутренними планетами, т. е. Меркурий, Венера, Земля и Марс, принадлежат к земной, или терриальной (от латинского *Terra* — Земля), группе, так как имеют много общего. Все эти планеты, небольшие по размерам и массе (самая крупная из них — Земля), имеют твердую поверхность, сравнительно высокую среднюю плотность, близкую к плотности Земли (5,52 г/см^3), и обладают атмосферами (кроме Меркурия).

Внешние планеты, движущиеся за кольцом астероидов, образуют группу планет-гигантов, возглавляемую Юпитером — самой крупной и массивной планетой Солнечной системы. К этой группе относятся Сатурн, Уран и Нептун. Планеты-гиганты характеризуются большими размерами и массами, быстрым вращением, сравнительно небольшой средней плотностью. Судя по всему, они не имеют твердой поверхности, а представляют собой газообразные шаровидные тела с холодными разреженными внешними слоями и горячими необычайно плотными недрами, сжатыми под давлением до десятков миллионов атмосфер, обусловленным огромной массой. Наземными наблюдениями установлено, что внешние слои этих планет состоят из водорода с вкраплениями аммиака (NH_3) и метана (CH_4).

Последняя планета Солнечной системы, Плутон, пока еще плохо изучена и трудно причислить ее к той или иной группе. Даже ее размеры и масса оценены весьма приближенно. Вероятнее всего, диаметр Плутона не превышает 0,2 диаметра Земли, а масса — не более 0,0024 массы нашей планеты.

МЕРКУРИЙ

Меркурий — наименьшая из терриальных планет Солнечной системы. Его диаметр равен 4880 км, масса — 0,055 массы Земли, а средняя плотность — 5,40 г/см^3.

Фотографии Меркурия, полученные 29 марта 1974 г. американской межпланетной станцией «Маринер-10» с расстояний от 233 000 до 7340 км (и снимки, выполненные той же станцией при двух последующих сближениях с планетой), показали его полное сходство с Луной (рис. 78 и 79). Обилие мелких и крупных кратеров, от 50 м до 200 км в поперечнике, иногда со светлыми лучами и с центральными горками; глубокие и широкие (до 10 км) долины, борозды и разломы в коре; крупные обрывы (эскарпы) высотой 2—3 км и протяженностью в сотни километров; холмы и разбросанные далеко друг от друга горные хребты с вер-

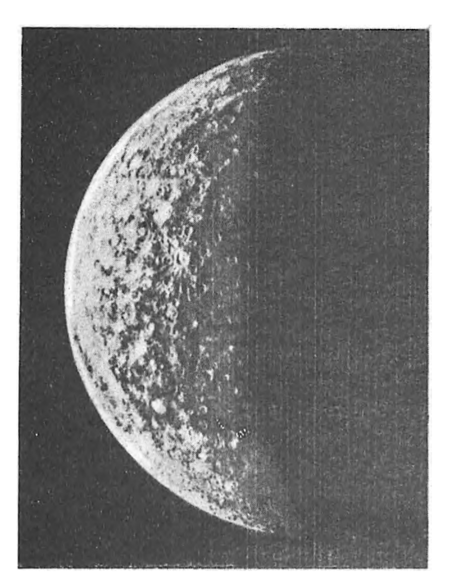


Рис. 78. Фотография Меркурия с близкого расстояния.



Рис. 79. Кратеры на Меркурии (размер кадра 560 × 430 км. Диаметр наибольшего кратера около 105 км).

шинами гор высотой до 4 км — такова поверхность Меркурия. Но обширных темных низменностей — «морей» (по лунной номенклатуре), кроме одной диаметром 1300 км, названной Морем Жары (Калорис), на планете не обнаружено, хотя небольшие по размерам низменности имеются.

Резко очерченные фазы планеты, четкий рельеф поверхности и отчетливые тени от гор свидетельствуют об отсутствии у Меркурия атмосферы. Правда, приборы «Маринера-10» зарегистрировали у поверхности Меркурия ничтожное количество гелия и аргона. Но давление этих газов в 500 млрд. раз меньше земного атмосферного давления, и поэтому с полным основанием можно считать Меркурий лишенным атмосферы.

Радиолокационные наблюдения с Земли установили медленное вращение Меркурия вокруг оси в прямом направлении (как у Земли) с периодом $P = 58{,}65$ земных суток, что составляет точно две трети периода его обращения вокруг Солнца ($P = \frac{2}{3}T$), равного $T = 87^{д}{,}97$ ($T \approx 88^{д}$). Период вращения планеты определяет продолжительность ее звездных суток и значительно отличается от длительности солнечных суток — суммарной продолжительности дня и ночи, или промежутка времени между последовательными полуднями. Длительность солнечных суток S на Меркурии легко подсчитать по уравнению синодического движения (3.10):

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{P} - \frac{1}{T},$$

положив в нем $P = \frac{2}{3}T$. Получается, что солнечные сутки на Меркурии длятся $S = 2T = 176$ земных суток[1], или два меркурианских года! От восхода до захода Солнца на экваторе планеты проходит целый ее год, 88 суток, и столько же длится ночь!

[1] Здесь и в дальнейшем счет времени дается в земных средних сутках и часах.

Это станет вполне понятным, если принять во внимание, что за интервал времени $\Delta t = \frac{1}{6} T = \frac{1}{4} P$ планета проходит по орбите дугу около 60° (движение планеты неравномерное), а поворачивается вокруг оси на 90°. Пусть в некоторый момент времени, например, меридиан *pA* Меркурия обращен к Солнцу и там наступил полдень (положение *1*, рис. 80). Тогда за $\frac{1}{3} T$ планета пройдет по орбите дугу около 120°, а повернется вокруг оси на 180° (положение *2*) и на меридиане *pA* еще длится день. Только еще через $\frac{1}{6} T = \frac{1}{4} P$, когда планета совершит пол-оборота вокруг Солнца (положение *3*), на этом меридиане Солнце зайдет за горизонт и сразу же настанет ночь, так как из-за отсутствия атмосферы сумерек на планете не бывает.

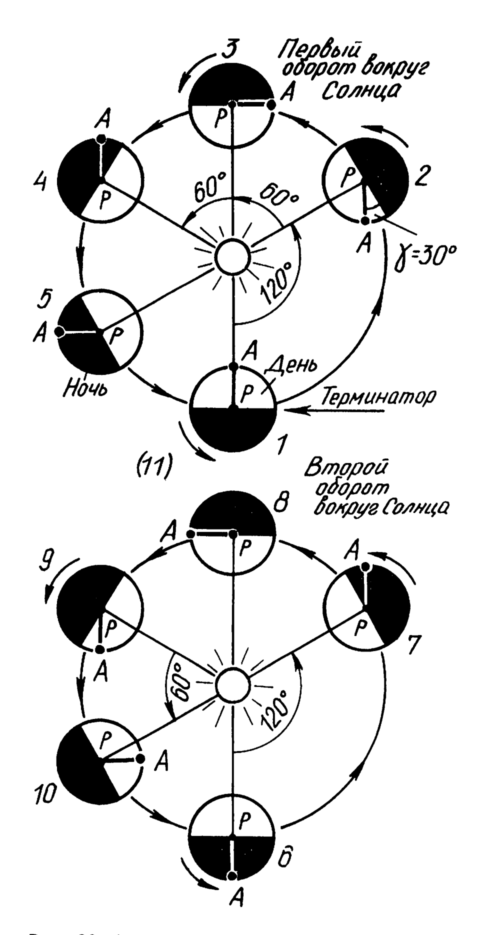


Рис. 80. Звездные и солнечные сутки на Меркурии.

По истечении периода вращения $P = \frac{2}{3} T$, когда планета повернется вокруг оси на 360°, она придет в положение *4* и меридиан *pA* займет первоначальное положение в пространстве, но будет находиться на ночном полушарии планеты. Еще через $\frac{1}{3} T = \frac{1}{2} P$ Меркурий займет положение *6* (идентичное положению *1*), и на меридиане *pA* наступит полночь, т. е. за один период обращения планеты $T = 88$ суток на ней протекает половина ее солнечных суток. Аналогично рассуждая, легко видеть, что восход Солнца на рассматриваемом меридиане произойдет в положении *8*, т. е. через меркурианский год после его захода (положение *3*), а очередной полдень (положения *11* и *1*) наступит после прохождения планетой положений *9* и *10* лишь по истечении двух периодов обращения планеты, т. е. через 176 суток.

Смена дня и ночи вне экватора планеты зависит от наклона ее оси, который еще точно не установлен. Сейчас принимают этот наклон $\varepsilon = 0°$, т. е. полагают, что ось планеты перпендикулярна к плоскости ее орбиты, хотя по некоторым измерениям отклонение оси от перпендикуляра может быть близко к $\varepsilon = 6$—7°. При $\varepsilon = 0°$ продолжительность дня и ночи на всей поверхности Меркурия одинакова (кроме полюсов, где Солнце всегда находится на горизонте и длится вечный день), а Солнце проходит в зените только над экватором. Но если $\varepsilon = 6°$,

то вдоль экватора образуется тропический пояс удвоенной ширины (тропики проходят на расстоянии $\varphi = \varepsilon = 6°$ от экватора), где Солнце в полдень периодически проходит в зените, а вокруг полюсов — полярные зоны такого же радиуса, в пределах которых периодически наступают полярные дни и полярные ночи длительностью на полюсах по половине меркурианского года, т. е. по 44 суток.

Суточное движение Солнца в небе Меркурия происходит несколько иначе, чем в небе Земли. Угловая скорость вращения Меркурия

$$\omega_c = \frac{360°}{58^{д},65} = \frac{360 \cdot 60'}{58,65 \cdot 24^{ч}} = 15',3 \quad \text{за один час.}$$

Следовательно, с такой же угловой скоростью происходит суточное вращение неба в направлении с востока к западу (как и неба Земли, но почти в 59 раз медленнее). Но из-за большого эксцентриситета орбиты ($e = 0{,}206$) угловая скорость орбитального движения планеты, вызывающего видимое смещение Солнца к востоку[1] в среднем на

$$\omega_a = \frac{360° \cdot 60'}{88^{д} \cdot 24^{ч}} = 10',2 \text{ за час,}$$

меняется за половину периода ее обращения от $\omega_q = 15',9$ за час (планета в перигелии) до $\omega_Q = 6',9$ за час (планета в афелии), а видимый диаметр Солнца — примерно от $1°,6$ до $1°,1$, т. е. в полтора раза[2]. Пока угловая скорость орбитального движения планеты меньше угловой скорости ее вращения ($\omega < \omega_c = 15',3$), суточный путь Солнца, вызываемый медленным вращением планеты, направлен с востока к западу (как и в небе Земли), причем Солнце заметно отстает от звезд, перемещаясь к западу с угловой скоростью $\Delta\omega = \omega_c - \omega$ за один час, т. е. движется в среднем в три раза медленнее звезд, так как

$$\frac{\omega_c}{\omega_c - \omega_a} = \frac{15',3}{15',3 - 10',2} = 3\,,$$

а когда Меркурий проходит афелий, то примерно в два раза медленнее

$$\frac{\omega_c}{\omega_c - \omega_Q} = \frac{15',3}{15',3 - 6',9} = 1{,}82\,.$$

Но когда планета приближается к перигелию, угловая скорость ее орбитального движения сначала сравнивается со скоростью вращения ($\omega = \omega_c$) и суточное движение Солнца останавливается, а затем, при $\omega > \omega_c$, Солнце смещается на фоне звезд к востоку быстрее, чем поворачивается планета, и тогда его суточное движение происходит с запада к востоку. Пройдя в этом направлении дугу около 1° (на что уходит примерно 8,5 земных суток), Солнце снова останавливается, так как вскоре после прохождения планетой перигелия опять наступает равенство угловых скоростей ($\omega = \omega_c$), и затем, при $\omega < \omega_c$, Солнце продолжает свой суточный путь к западу. Из мест поверхности планеты, где в это время восходит Солнце, видно, как оно, показавшись из-за восточного горизонта,

[1] Вспомним видимое годовое движение Солнца (см.с.30).

[2] Для сравнения напомним, что диаметр солнечного диска в небе Земли близок к $0°,5$.

опять прячется за него, а затем снова появляется и постепенно поднимается в небо. В местах захода Солнца наблюдается его исчезновение за западный горизонт, потом появление из-за него и наконец окончательное погружение и наступление продолжительной ночи.

За длительный день подсолнечные области планеты (т. е. там, где Солнце проходит в зените) нагреваются солнечными лучами от +340°C (когда планета в афелии) до +430°C (планета в перигелии), а ночью поверхность охлаждается до —170°C.

У Меркурия обнаружено в 150 раз более слабое магнитное поле, чем у Земли. В сочетании со значительной средней плотностью планеты это подтверждает наличие у нее небольшого по размерам, но плотного железистого подвижного ядра. Радиоизлучение планеты невелико. Спутников Меркурий не имеет.

ВЕНЕРА

Поверхность Венеры недоступна оптическим наблюдениям с Земли, так как планета окутана плотными облаками. Поэтому подавляющее большинство физических характеристик планеты получено радиометодами и космическими исследованиями.

Масса Венеры равна 0,815 массы Земли, а ее радиус $R = 6050$ км, или 0,950 радиуса Земли, и, следовательно, средняя плотность вещества планеты составляет 5,26 г/см^3.

Ось вращения планеты отклонена от перпендикуляра к плоскости ее орбиты всего лишь на 3°. Планета вращается вокруг оси с востока на запад (т. е. навстречу вращению Земли) с периодом $P = 243{,}16$ суток, так что, по земным представлениям, Солнце на Венере восходит на западе, а заходит на востоке, хотя, конечно, на планете восточной стороной горизонта считается та, где восходит Солнце. Вращение Венеры называется обратным, и периоду ее вращения часто приписывают отрицательный знак, а чтобы помнить об этом, наклон оси планеты принимается равным 177°.

Зная период обращения Венеры вокруг Солнца $T = 225^д$ и ее звездные сутки $P = -243^д$, легко по уравнению синодического движения найти продолжительность солнечных суток планеты:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{P}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{S} = \frac{1}{225} - \frac{1}{-243} = \frac{243 + 225}{225 \cdot 243},$$

что дает $S = 117$ суток.

Из-за очень малого наклона оси оба полушария планеты освещаются идентично, и почти на всей ее поверхности день и ночь длятся по 58 суток, за исключением полярных зон (3° вокруг полюсов), в центре которых продолжительность дня и ночи достигает 112 суток.

Ускорение силы тяжести на поверхности Венеры составляет 0,90 земного, а критическая скорость $w_п = 10{,}4$ км/с. Поэтому планета удерживает плотную атмосферу, открытую еще 6 июня 1761 г. М. В. Ломоносовым во время наблюдений прохождения Венеры по диску Солнца. Наличие атмосферы приводит к очень интересному явлению, не наблюдаемому ни у Луны, ни у Меркурия. Когда Венера вблизи нижнего соединения видна в фазе узкого серпа, его рога необычайно удлиняются, а иногда и смыкаются друг с другом. Это явление,

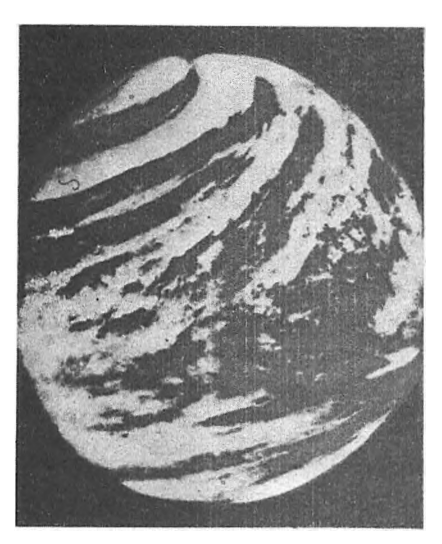


Рис. 81. Фотография Венеры с близкого расстояния.

называемое сумеречной дугой, объясняется преломлением солнечного света при прохождении сквозь атмосферу планеты.

Непосредственные исследования атмосферы планеты выполнены советскими автоматическими станциями «Венера-4» — «Венера-8» в 1967—1972 гг., «Венера-9», «Венера-10» в октябре 1975 г. и «Венера-11», «Венера-12» в декабре 1978 г.

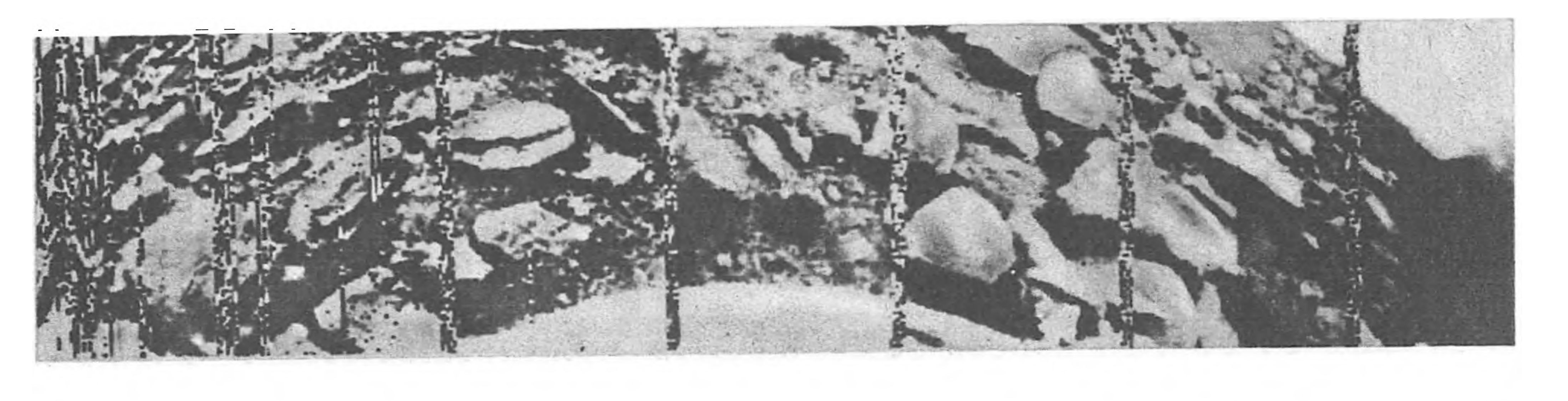
В результате исследований выяснилось, что атмосфера Венеры почти на 97% состоит из углекислого газа, содержит примерно 2% азота и 0,1% кислорода и около 0,01% водяных паров. Ее плотность у поверхности планеты превышает плотность нижних слоев земной атмосферы почти в 65 раз, а атмосферное давление достигает 93 атм ($\approx 9{,}3 \cdot 10^6$ Па).

Преобладающий в атмосфере Венеры углекислый газ создает на планете парниковый эффект, состоящий в том, что солнечные лучи, воспринимаемые глазом, проходят (хотя и не полностью) сквозь атмосферу и за долгий венерианский день значительно нагревают поверхность планеты. Тепловое излучение поверхности, в том числе и поступающее из недр планеты, крайне медленно уходит в окружающее пространство, так как оно почти не пропускается углекислым газом. Из-за этого поверхность Венеры и нижние слои ее атмосферы нагреты до высокой температуры от +465 до +480°С.

Облачный слой планеты начинается на высоте около 30 км над ее поверхностью, где атмосферное давление составляет 10 атм (10^6 Па), и тянется до высоты 75 км. Наиболее плотный ярус облаков, напоминающих легкий туман, расположен на высоте 50—63 км. Облачный слой не сплошной, а имеет зональное строение со значительными разрывами, хорошо заметными на фотографиях планеты, полученных в феврале 1974 г. «Маринером-10» с расстояния 726 000 км (рис. 81). Природа облаков до сих пор не установлена,хотя не исключено, что в них содержатся капельки воды и мельчайшие кристаллики льда.

Хотя атмосфера Венеры вместе с облачным покровом отражает 76% солнечного света и существенно ослабляет прошедшее сквозь нее излучение, все же освещенность дневного полушария планеты значительна и по прямым измерениям аппаратурой советских межпланетных станций примерно такая же, как в облачный день на Земле. Это подтверждается и прекрасными фотоснимками поверхности планеты в районах посадки спускаемых блоков автоматических станций «Венера-9» и «Венера-10» (рис. 82). На снимках хорошо видны небольшие камни размером от 30 см и выше, а также более крупные глыбы, какие выбрасываются при вулканических извержениях.

Рельеф поверхности Венеры изучается сравнительно недавно посредством радиолокации как с Земли, так и с искусственных спутников «Венера».



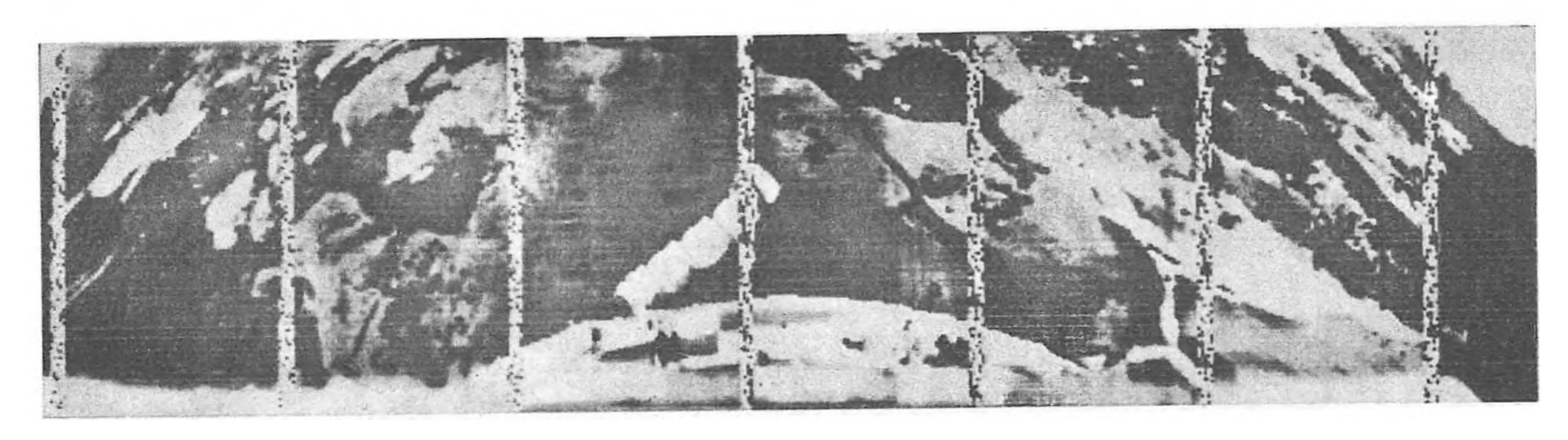


Рис. 82. Поверхность Венеры в местах посадки спускаемых аппаратов автоматических станций «Венера-9» (вверху) и «Венера-10» (внизу).

Радиолокационные измерения установили, что поверхность Венеры значительно сглажена по сравнению с поверхностью Луны и Меркурия. На ней обнаружены огромная округлая низина протяженностью до 1500 км в направлении с севера на юг и до 1000 км с запада к востоку, гладкая равнина длиной около 800 км и горы высотой до 5 км, в том числе кольцевые (наподобие лунных кратеров), диаметром от 30 до 160 км и глубиной до 400 м. Среди гор имеется огромный пологий вулкан диаметром 350 км у подножия и с кратером около 80 км в поперечнике, но высота вулкана не превышает 1 км. Вблизи экватора планеты найден гигантский разлом (трещина в коре) длиной до 1500 км, шириной около 150 км и глубиной 2 км. Этот разлом свидетельствует о тектонических процессах в недрах планеты, приводящих к сдвигу слоев ее коры и к горообразованию.

Таким образом, Венера — горячая планета с шероховатым грунтом, неровным пустынным и малогористым рельефом, а также с кратерами и действующими вулканами.

Водных бассейнов на Венере нет. Магнитное поле у нее отсутствует. Естественных спутников планета не имеет.

МАРС

Поверхность Марса хорошо видна в телескопы. Это позволило сравнительно точно измерить его угловые размеры и по ним вычислить линейный диаметр $D \approx 6800$ км, или 0,533 диаметра Земли. Масса планеты равна 0,107 массы Земли. Средняя плотность вещества планеты составляет 3,94 г/см^3, или 0,72 плотности Земли.

Светлые желтого и оранжевого оттенка области поверхности планеты, представляющие собой песчаные пустыни, условно названы материками, обширные темные области — морями, их выступы — заливами, а отдельные небольшие темные пятна — оазисами и озерами, хотя на Марсе нет открытых водоемов — ни морей, ни озер, ни рек.

Вращение планеты прямое с периодом $P = 24^ч37^м23^с$ (марсианские звездные сутки), что определяет длительность ее солнечных суток $S = 24^ч39^м29^с$, которые продолжительнее земных всего лишь на $39^м,5$. Наклон оси вращения Марса равен 24°48′, т. е. близок к наклону земной оси (23°27′). Поэтому на Марсе, как и на Земле, имеются жаркий, два умеренных и два холодных тепловых пояса, а также происходит смена сезонов года, каждый из которых почти в два раза продолжительнее земных сезонов, поскольку марсианский год длится 687 земных суток. Но контрасты сезонов года на Марсе иные, чем на Земле, так как он удален от Солнца в 1,52 раза дальше Земли, получает от него тепла в 2,3 раза меньше, лишен водных бассейнов, снежной зимы, как и жаркого лета.

Среднегодовая температура поверхности Марса близка к —70°С. Но в экваториальном поясе шириной $24°48' \cdot 2 = 49°36'$, где Солнце в полдень различных дней марсианского года проходит в зените, температура поверхности планеты, в зависимости от ее гелиоцентрического расстояния, повышается до +20... + 30°С, к заходу Солнца снижается до —10°С и ниже, а под утро падает до —90°С. Такие резкие колебания температуры объясняются очень разреженной атмосферой Марса, которая не в состоянии сохранить тепла, полученного днем поверхностью планеты, и в ночное время оно быстро излучается в мировое пространство.

В полярных областях планеты, ограниченных полярными кругами с широтой 65°12′, во время марсианской зимы температура понижается до —120°С, и вокруг полюсов, до расстояния в 40° от них, распространяются обширные белые пятна, называемые полярными шапками. Размеры полярных шапок в течение года меняются: они становятся весной меньше, в летнее время северная полярная шапка часто совсем исчезает, а южная уменьшается до небольших размеров. В летнем полушарии планеты по мере таяния полярной шапки наблюдаются изменения морей, заливов, оазисов и озер: они становятся более интенсивными, приобретают синевато-зеленоватую окраску, а иногда несколько изменяют форму и размеры. С наступлением осени их интенсивность ослабевает, а цвет приближается к коричневато-бурому оттенку. Создается впечатление, что темные области марсианской поверхности покрыты растительностью, расцветающей летом и увядающей осенью. В этом нет ничего невероятного, так как хорошо известна высокая приспособляемость растительности к самым суровым условиям существования. Правда, влага содержится в атмосфере Марса в ничтожном количестве, но она может поступать к растениям из подпочвенных слоев, в которых возможны ее резервы.

При исключительно хороших земных атмосферных условиях некоторые наблюдатели видят в небольшие телескопы на поверхности Марса сеть тонких темных линий, впервые открытых во время великого противостояния Марса в 1877 г. итальянским астрономом Дж. Скьяпарелли (1835—1910), который назвал их каналами, т. е. по-итальянски проливами. Однако при наблюдениях в сильные телескопы каналы не видны — они распадаются на отдельные пятна и отрезки изогнутых линий. При небольших увеличениях, применяемых в малых телескопах, эти детали сливаются и создают впечатление сети каналов на поверхности планеты.

Выдающиеся исследования Марса проведены советскими («Марсы») и американскими («Маринеры») космическими станциями в 1965—1977 гг. Некоторые из них стали искусственными спутниками Марса.

В марте 1974 г. от советской космической станции «Марс-6», прошедшей вблизи Марса, отделился спускаемый аппарат (посадочный блок), который плавно опустился на поверхность красной планеты и впервые в истории человечества доставил научные приборы для ее изучения. Аналогичную мягкую посадку на поверхность Марса совершили посадочные блоки, отделившиеся от станций «Викинг-1» (20 июля 1976 г.) и «Викинг-2» (4 сентября 1976 г.).

Космические станции передали на Землю прекрасные фотографии различных участков поверхности планеты и сведения о ее температуре, атмосфере и магнитном поле.

Ни на одном фотоснимке каналов не обнаружено, так как их на Марсе не существует, зато четко видны разломы в коре, глубокие ущелья, овраги, руслообразные изгибающиеся протоки — меандры (русла прежних рек), горные хребты, цепи и пики высотой до 15 км с очень пологими склонами, складки, валы, долины и множество кратеров диаметром от 100 м до 200 км (рис. 83 и 84). Особенно много оврагов и меандров проходит по склонам гор. Крупные кратеры, очевидно, имеют вулканическое происхождение, а более мелкие — ударное, т. е. они возникли при падении крупных метеоритов, в обилии выпадавших (а может быть, и теперь выпадающих) на поверхность Марса из близкого к нему пояса астероидов.

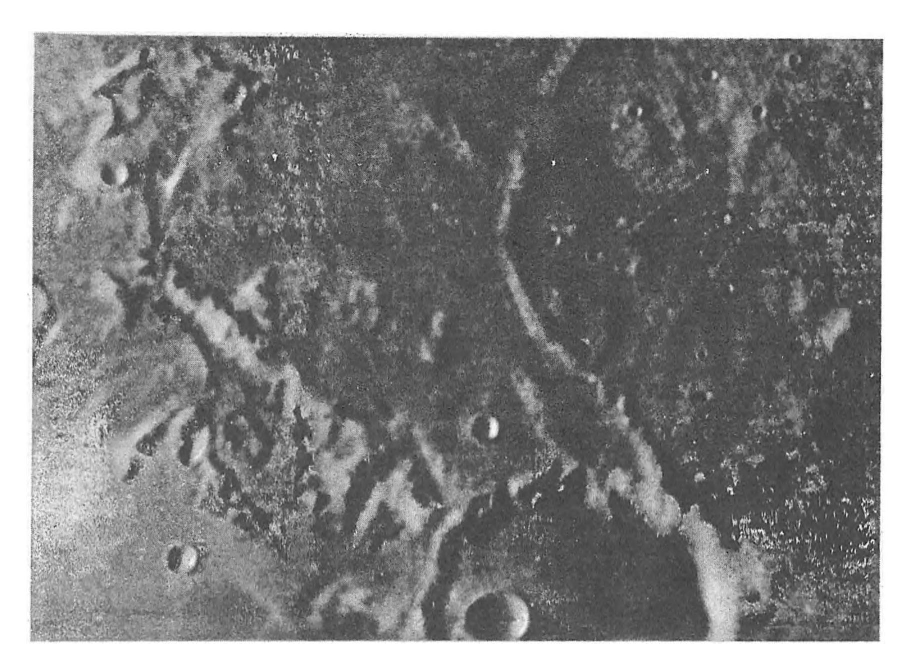


Рис. 83. Кратеры и валы на поверхности Марса.

На планете имеются конусообразные вулканические горы с жерлами на вершинах и с застывшими потоками базальтовой лавы по склонам. Большинство вулканических гор находится в северном полушарии, в том числе и самая высокая, называемая Олимпом (или Снежным Олимпом), поднимающаяся над окружающей ее местностью на 20 км, — это высочайшая гора в Солнечной системе. Очевидно, в прошлом Марс был активной планетой, что подтверждается обилием базальтовых глыб и камней в районах посадки спускаемых блоков обоих «Викингов» (рис. 85), разделенных расстоянием в 7300 км.

Химический анализ марсианского грунта, выполненный теми же посадочными блоками, выявил в нем обилие окислов железа, придающих поверхности планеты красноватый цвет, а также большое количество кремния, фосфора и кальция.

Исследования, проведенные космическими станциями, подтвердили крайнюю разреженность марсианской атмосферы, благодаря чему поверхность планеты хорошо видна с Земли. Атмосферное давление у поверхности Марса не превышает 0,007 атм (700 Па), т. е. примерно такое же, как на высоте около 40 км над земной поверхностью. При таком низком атмосферном давлении вода в жидкой фазе находиться не может, так как уже при температуре около +5°С превращается в пар, но может существовать в виде пара, снега и льда. В атмосфере планеты содержится до 95% углекислого газа, около 2% азота, 1,5% аргона, 0,3% кислорода и примерно 0,01% водяных паров, а в верхних ее слоях обнаружен в небольшом количестве озон. Марс, имея небольшую массу, не смог удержать плотной атмосферы, так как критическая скорость на его поверхности $w_{\text{П}} = 5$ км/с, а для рассеяния газов в марсианских условиях вполне

достаточна скорость газовых молекул $v = 1{,}2$ км/с. Поэтому атмосфера Марса очень разрежена и в основном состоит из тяжелых газов.

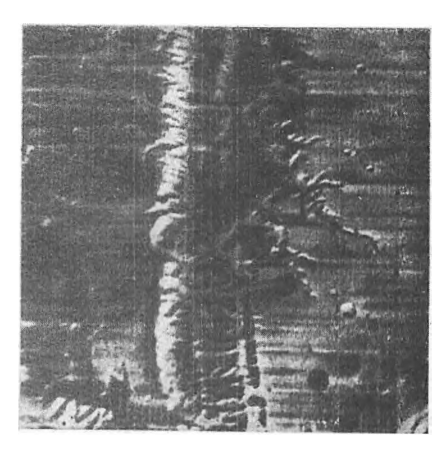


Рис. 84. «Большой Каньон» и овраги на Марсе. Ширина каньона 120 км, глубина около 6 км. Размер кадра 400×320 км.

Хотя водяные пары присутствуют в атмосфере Марса в ничтожном количестве (в 1000 раз меньше, чем в земной атмосфере), но заметное различие их содержания над разными участками поверхности планеты заставляет думать о возможности их поступления из ее грунта, глубоко под которым могут залегать резервуары воды. Такое убеждение возросло после пролетов «Викинга-2» в августе 1976 г. над северным полушарием планеты, где в это время было лето. «Викинг-2» зарегистрировал резко повышенное содержание водяных паров над северной полярной шапкой и установил, что шапка состоит из смеси твердой углекислоты и водяного льда, свидетельствующего об обилии на планете грунтовых вод. Эта же космическая станция зафиксировала густые облака, окутывающие горные вершины, и плотный туман в горных долинах. Судя по всему, облака состоят из мелких ледяных кристалликов. Южная полярная шапка часто полностью не исчезает летом, видимо, потому, что она лежит на высокой возвышенности, где удерживается очень низкая температура.

В разреженной марсианской атмосфере временами возникают сильные ветры, скорость которых иногда достигает 50 м/с. Они вызывают мощные пылевые бури, поднимающиеся на высоту до 20 км. В это время с Земли наблюдается сильное помутнение вида планеты. Кроме того, ветры приводят к образованию



Рис. 85. Поверхность Марса в месте посадки спускаемого блока космической станции «Викинг-1». Хорошо видны тени от камней.

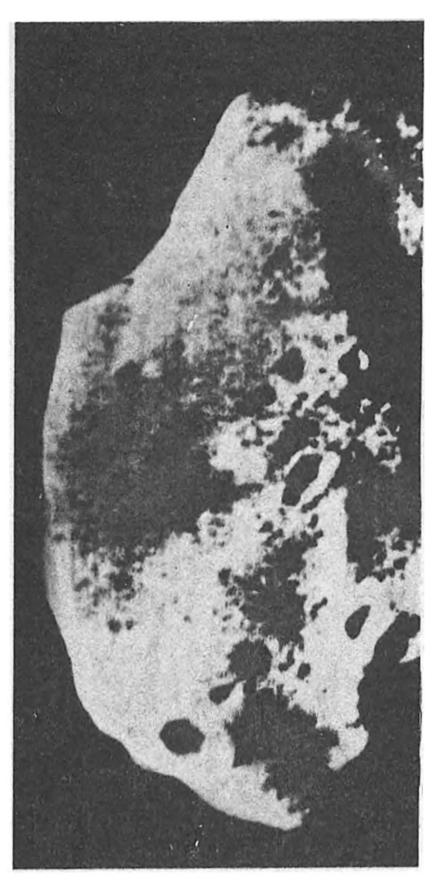




Рис. 86. Спутники Марса — Фобос (вверху) и Деймос (внизу).

на равнинах песчаных дюн и волн, хорошо различимых на фотографиях, переданных искусственными спутниками планеты.

Исследования Марса космическими станциями пока не дали положительного ответа на вопрос об органической жизни на планете.

У Марса обнаружено магнитное поле,в 500 раз более слабое, чем магнитное поле Земли, причем его полярность противоположна полярности земного поля, т. е. северный магнитный полюс расположен в северном полушарии планеты, а южный — в южном полушарии. Магнитное поле над дневной стороной планеты простирается до расстояния в 2000 км от ее поверхности, а над ночной стороной — до 9500 км.

Марс имеет двух естественных спутников — Фобоса и Деймоса[1], открытых американским астрономом А. Холлом в августе 1877 г. Эти спутники видны лишь в сильные телескопы. Оба спутника сфотографированы (рис. 86) космическими станциями. Они оказались бесформенными глыбами размерами $27\times21\times19$ км (Фобос) и 16×10 км (Деймос). Поверхность спутников покрыта кратерами диаметрами от 50 м до 5 км, несомненно являющимися результатом метеоритных ударов, так как в недрах малых тел вулканическая деятельность невозможна.

Видимые с поверхности Марса угловые размеры Фобоса в полной фазе не превышают 14′, а его блеск равен $-9^m,0$, поэтому его вид в этой фазе несколько напоминает Луну в фазе первой четверти, наблюдаемой с Земли. Деймос же в полной фазе выглядит яркой звездой $-5^m,2$, т. е. он в два раза ярче Венеры в наибольшем

[1] В греческой мифологии Фобос (Страх) и Деймос (Ужас) — спутники бога войны Ареса (в римской мифологии — Марса).

блеске ($-4^m,4$), а его угловой диаметр почти не различим невооруженным глазом, так как близок к $2'$.

Спутники движутся почти в плоскости экватора планеты, с отклонением от нее до $2°,7$. Фобос обращается вокруг Марса с периодом в $7^ч39^м,2$ на среднем расстоянии в 9400 км, т. е. на высоте около 6000 км над поверхностью планеты. За один оборот планеты вокруг оси он успевает более трех раз обежать вокруг нее в прямом направлении, восходя на западе и заходя на востоке. При каждом своем обращении он полностью меняет фазы. Движение Фобоса на фоне звездного неба Марса настолько быстрое, что заметно невооруженному глазу, так как за одну минуту времени он смещается к востоку примерно на $47'$, т. е. на 1,5 диаметра лунного диска, видимого с Земли (вспомним, что Луна в небе Земли смещается к востоку на $0°,5$ за 1 ч или на $0',5$ за одну минуту времени).

Среднее расстояние Деймоса от Марса составляет 23 500 км, а период его обращения равен 1,262 суток, или $30^ч18^м$, т. е. он перемещается по небу тоже с запада к востоку, но несколько медленнее вращения планеты. Угловая скорость обращения Деймоса $11°,9$ в час, а угловая скорость вращения Марса $14°,6$ в час. Следовательно, Деймос очень медленно смещается относительно поверхности Марса к западу на $2°,7$ за час и в то же время заметно для невооруженного глаза перемещается на фоне звездного неба к востоку почти на $12'$ за одну минуту времени.

По уравнению синодического движения легко вычислить, что Деймос проходит над определенным местом поверхности планеты через каждые $131^ч,4$. Восходя на востоке, он медленно поднимается над горизонтом в направлении к западу и только почти через 66 ч заходит за горизонт. За это время на планете проходит более двух с половиной солнечных суток, и, таким образом, Деймос восходит и заходит не каждый день, но зато в среднем за $30^ч21^м$ полностью меняет фазы.

ЮПИТЕР

Юпитер (рис. 87) настолько велик, что его масса почти в 2,5 раза превышает суммарную массу всех остальных планет и в 318 раз больше массы Земли. Видимый диск Юпитера представляет собой верхние слои его плотной, протяженной атмосферы. Даже в небольшие телескопы хорошо заметно сжатие планеты вдоль оси вращения, равное $^1/_{16}$, т. е. экваториальный диаметр диска в 1,07 раза больше полярного. Экваториальный, полярный и средний радиусы планеты соответственно в 11,2, в 10,5 и в 10,9 раза превосходят радиус Земли, ускорение силы тяжести в 2,67 раза больше земного, а критическая скорость $w_п = 60,4$ км/с. Ось вращения планеты отклонена от перпендикуляра к плоскости ее орбиты всего лишь на $3°07'$.

Значительное сжатие Юпитера объясняется его быстрым вращением, имеющим зональный характер: экваториальная зона вращается с периодом $9^ч50^м,5$, а умеренные зоны — $9^ч55^м,7$, т. е. медленнее. Это подтверждает газовую природу диска планеты, на котором хорошо видны темные полосы и пятна красновато-бурых оттенков и различной интенсивности (см. цветную вклейку, рис. 5). Они представляют собой своеобразные облака в атмосфере, порождаемые нисходящими потоками в ней, в отличие от светлых желтоватых зон, образуемых восходящими потоками. Наиболее интенсивны две широкие экваториальные



Рис. 87. Фотография Юпитера с близкого расстояния. Внизу слева — Красное пятно. На экваторе — тень от первого спутника.

полосы, вытянутые по обе стороны вдоль экватора планеты, где скорость газовых течений достигает 100 м/с.

Водородный состав атмосферы, быстрое зональное вращение и малая средняя плотность планеты, равная 1,35 г/см^3, привели к мысли о газообразном состоянии Юпитера и об отсутствии у него твердой поверхности. В 1950—1951 гг. советские астрофизики академик В. Г. Фесенков (1889—1972) и профессор А. Г. Масевич теоретически показали, что физические характеристики Юпитера и других планет-гигантов вполне объяснимы, если принять, что они состоят примерно на 75—85% из водорода, 25—15% гелия и небольших примесей более тяжелых химических элементов. Тогда в глубоких недрах планет-гигантов температура может достигать десятков тысяч градусов, из-за колоссального давления водород должен находиться в жидком и даже, может быть, в твердом, особо уплотненном состоянии (фазе), называемом металлическим, при котором атомы водорода разрушены и свободные электроны придают водороду свойства электропроводности.

В 1970 г., основываясь на многочисленных оптических и радионаблюдениях планет-гигантов, В. П. Трубицын и В. Н. Жарков получили о внутреннем строении этих планет результаты, сходные с выводами В. Г. Фесенкова и А. Г. Масевич. Но те и другие расчеты предусматривали присутствие гелия в атмосферах планет, а его-то наземные наблюдения не обнаруживали.

Направленная 3 марта 1972 г. к Юпитеру американская автоматическая станция «Пионер-10» 4 декабря 1973 г. сблизилась с планетой до расстояния в 131 тыс. км. от ее поверхности. Станция передала 340 фотоснимков Юпитера и его четырех наиболее крупных (галилеевых) спутников. Она обнаружила в атмосфере Юпитера 17% гелия, интенсивность линий которого в спектре Юпитера в 100 раз слабее интенсивности линий водорода, и именно поэтому он с Земли не наблюдается. Таким образом, теоретические расчеты советских астрофизиков полностью подтверждены наблюдениями вблизи планеты.

По современным воззрениям, Юпитер представляет собой гелиево-водородный сфероид с незначительными примесями метана, аммиака и цианидов. Наружный слой планеты, называемый атмосферой, простирается в глубину до 15 тыс. км, или около 0,2 радиуса планеты, и содержит 82% водорода и 17% гелия в газообразном молекулярном состоянии. В атмосфере имеются незначительные примеси метана (CH_4), аммиака (NH_3), этана (C_2H_6) и водяных паров. Температура верхних слоев атмосферы близка к —130°С, давление в них приближается к 1 атм (10^5 Па), а плотность — около 10^{-4} г/см^3. С глубиной все эти величины возрастают, и в нижних слоях атмосферы водород и гелий находятся в смешанном газово-жидком состоянии. На глубине около 0,3 радиуса

планеты температура повышается до 11 000°C, давление — до 3 млн. атм ($3 \cdot 10^{11}$ Па), плотность водорода резко увеличивается до 0,7—0,8 г/см^3 и он переходит в жидкую металлическую фазу. На глубине несколько большей 0,9 радиуса планеты температура достигает 30 тыс. градусов, а давление — 40 млн. атм ($4 \cdot 10^{12}$ Па), и под этим колоссальным давлением плотность смеси водорода с гелием и небольшими примесями более тяжелых химических элементов возрастает до 3—4 г/см^3. Эту наиболее глубинную зону с поперечником около 8—10 тыс. км можно считать ядром планеты.

Юпитер получает от Солнца в 27 раз меньше энергии, чем Земля, и верхние слои его атмосферы, отражая 45% получаемой энергии, должны были бы иметь температуру около —160°C. Но реальная их температура, измеренная «Пионером-10» на дневной и ночной стороне планеты, оказалась близкой к —130°C, так как вследствие своих горячих недр Юпитер излучает тепла в 2,7 раза больше, чем получает от Солнца.

Жидкие недра и быстрое вращение планеты породили у нее сильное магнитное поле, которое даже у края планеты в 47 раз больше магнитного поля Земли. Это магнитное поле, ослабевая, все еще остается заметным на расстоянии в 3 млн. км. Магнитное поле улавливает летящие от Солнца заряженные микрочастицы (ионы и ядра гелия, протоны, электроны и др.), которые образуют вокруг планеты протяженное и широкое плазменное кольцо, называемое радиационным поясом[1]. Колебания плазмы в магнитном поле планеты вызывают сильное радиоизлучение, обнаруженное наземными наблюдениями еще в 1955 г. и уступающее по воспринимаемой мощности лишь радиоизлучению Солнца. Ось магнитного поля планеты отклонена от оси ее вращения на 11°, и оно направлено противоположно магнитному полю Земли, т. е. как у Марса. Радиационный пояс Юпитера в 40 тыс. раз интенсивнее земного и простирается на расстояние до 2,5 млн. км (примерно до 35 радиусов) от планеты с явно выраженным максимумом в зоне до 1 млн. км (14 радиусов).

В южном полушарии Юпитера выделяется большое устойчивое образование овальной формы и розового цвета, известное под названием Красного пятна. Его размеры близки к 35 000 км по долготе и до 14 000 км по широте, а интенсивность постоянно меняется, и бывают годы, когда оно плохо различимо. Атмосферные течения обтекают его со всех сторон. На фотографиях, полученных космическим аппаратом «Пионер-11», пролетевшим в декабре 1974 г. на расстоянии в 43 000 км от планеты, четко видны в атмосфере Юпитера циклонные вихри. По-видимому, Красное пятно тоже имеет вихревую структуру, как и Белое пятно поперечником около 16 000 км, обнаруженное «Пионером-10». Но окончательная природа обоих пятен еще не установлена.

Еще в 1960 г. советский астроном С. К. Всехсвятский предсказал у Юпитера окружающее его тонкое кольцо из мелких частиц. Это кольцо обнаружено в 1979 г. американской станцией «Вояджер-1», пролетевшей вблизи поверхности планеты. Диаметр кольца 24 300 км, ширина около 8700 км и толщина порядка 30 км.

Вокруг Юпитера обращается 14 спутников; четыре, наиболее крупные и сравнимые по размерам и массе с Луной, открыты еще Галилеем в январе 1610 г.

---

[1] Аналогичный, но значительно более слабый радиационный пояс имеется и у Земли.

и видны даже в бинокль. Они вращаются вокруг своих осей синхронно, т. е. повернуты к Юпитеру всегда одной стороной (как Луна к Земле), и обращаются вокруг него в плоскости его экватора в прямом направлении по орбитам с малыми эксцентриситетами. Им присвоены имена, заимствованные из древнегреческой мифологии: Ио (древнегреческое божество Луны), Европа (божество земледелия), Ганимед (любимец и виночерпий Зевса) и Каллисто (возлюбенная Зевса, превращенная им в созвездие Большой Медведицы). Спутники Ио и Ганимед обладают метановой атмосферой в тысячу раз разреженнее атмосферы Земли. 5 марта 1979 г. «Вояджер» обнаружил на спутнике Ио шесть действующих вулканов.

5-й спутник диаметром 160 км и 14-й спутник диаметром 40 км отстоят от планеты на расстояниях соответственно 181 000 и 140 000 км.

№	Название	Блеск	Расстояние от Юпитера, в тыс. км	Период обращения, в сутках	Диаметр		Масса, в массах Луны
					в км	в диаметрах Луны	
I	Ио	$4^m,8$	422	1,769	3470	1,00	1,14
II	Европа	5,2	671	3,551	3100	0,89	0,64
III	Ганимед[1]	4,5	1070	7,155	5000	1,44	2,09
IV	Каллисто	5,5	1883	16,689	4700	1,35	1,18

Остальные восемь спутников размерами от 120 до 11 км движутся на средних расстояниях от 11,5 до 23,7 млн. км, причем четыре далеких (XII, XI, VIII и IX спутники) обращаются в обратном направлении по весьма вытянутым орбитам.

При своем движении близкие спутники погружаются в тень планеты (затмения спутников), скрываются за планетой (покрытия спутников), проходят перед ней (прохождения спутников) и отбрасывают тень на ее диск. Эти явления хорошо видны даже в небольшие телескопы.

САТУРН

Эта планета более всех других планет-гигантов похожа на Юпитер. Ее масса в 95 раз и средний диаметр в 9,1 раза превышают земные, а сжатие даже больше, чем у Юпитера, и составляет $^1/_{10}$, т. е. экваториальный диаметр планеты в 9,4, а полярный в 8,5 раза больше диаметра Земли. Ускорение силы тяжести на Сатурне в 1,15 раза превышает земное, а критическая скорость равна 36 км/с. Ось вращения планеты наклонена под углом в 26°45′ и если бы она по своей природе походила на Землю и находилась значительно ближе к Солнцу, то на ней сменялись бы сезоны года. Но структура Сатурна такая же, как у Юпитера, и он тоже вращается зонально с периодами в $10^ч14^м$ (экваториальный пояс) и в $10^ч38^м$ (умеренные пояса). О газообразной структуре планеты свидетельствует и ее

[1] Этот спутник больше Меркурия.

небольшая средняя плотность, равная 0,7 г/см^3, т. е., образно говоря, если бы Сатурн оказался в воде, то он плавал бы на ее поверхности.

Из-за меньшей (в сравнении с Юпитером) массы Сатурна давление в его недрах нарастает медленнее и, по-видимому, слой жидкого водорода в смеси с гелием начинается на глубине, равной половине радиуса планеты, где температура достигает 10 000°С, а давление — 3 млн. атм ($3 \cdot 10^{11}$ Па). Температура поверхностного слоя планеты близка к —170°С, в то время как должна бы быть около —190°С, так как он отражает 45% солнечной энергии, доходящей до планеты в количестве в 92 раза меньшем, чем до Земли. Следовательно, дополнительная энергия, повышающая температуру, поступает из горячих недр планеты.

Радиоизлучение Сатурна сравнительно небольшое и исходит от его диска, а не от смежных с ним зон, как у Юпитера, что свидетельствует об отсутствии у планеты заметного радиационного пояса и магнитного поля, которое наземными наблюдениями не обнаружено.

У Сатурна — двенадцать спутников, из которых только шестой спутник, Титан (8^m,4), виден в небольшие телескопы школьного типа. Этот спутник почти в полтора раза больше Луны по диаметру и окружен плотной аммиачно-метановой атмосферой. Остальные спутники значительно меньше Луны, их диаметры от 1400 до 300 км, и атмосферы у них нет. Все спутники Сатурна обращаются в прямом направлении и только самый далекий, девятый спутник — Феба (14^m), отстоящий от планеты почти на 13 млн. км, движется в обратном направлении по орбите, наклоненной к экватору планеты на угол[1] $i = 150°$, и завершает один оборот за 550 суток.

У Сатурна тоже имеется кольцо, открытое X. Гюйгенсом еще в 1659 г., а точнее, семь концентрических тонких плоских колец, которые отделены друг от друга темными промежутками и обращаются вокруг планеты в плоскости ее экватора. В небольшие телескопы видны только два кольца и темный промежуток между ними, называемый щелью Кассини, по имени французского астронома Д. Кассини (1625—1712), обнаружившего этот промежуток в 1675 г. Внешнее кольцо, обозначаемое буквой *A*, менее ярко, чем отделенное от него щелью Кассини кольцо *B* (см. цветную вклейку, рис. 2), внутри которого находится третье кольцо *C*, из-за своей малой яркости называемое креповым и видимое только в сильные телескопы. Ниже приводятся размеры трех колец Сатурна в километрах и в экваториальных диаметрах планеты (*D*).

Объект	Диаметр внешнего края	Диаметр внутреннего края
Кольцо *A*	276 тыс. км (2,30 *D*)	240 тыс. км (2,00 *D*)
Щель Кассини, ширина 4000 км		
Кольцо *B*	232 тыс. км (1,93 *D*)	180 тыс. км (1,50 *D*)
Темный промежуток, ширина 1000 км		
Кольцо *C*	178 тыс. км (1,48 *D*)	144 тыс. км (1,20 *D*)

[1] Угол между плоскостями $i' = 30°$, но при обратном движении наклонение принимается бо́льшим 90°, т. е. наклонение $i = 180° - i' = 150°$.

Как установили из независимых наблюдений еще в 1895 г. выдающийся астрофизик А. А. Белопольский (Россия), А. Деландр (Франция) и Дж. Килер (США), кольца обращаются вокруг планеты в соответствии с законами Кеплера: внешний край наружного кольца *A* — со скоростью 16,6 км/с (период обращения $14^ч,5$), а внутренний край наиболее яркого кольца *B* — со скоростью 20,5 км/с (период обращения $7^ч,7$). Это доказывает, что кольца не сплошные, а имеют метеоритную структуру, т. е. состоят из мириадов частиц различных размеров, обращающихся вокруг планеты наподобие ее спутников: с увеличением расстояния от планеты скорость обращения уменьшается.

На основании приведенных выше данных рекомендуем читателям вычислить скорость и периоды обращения краевых частей всех трех колец.

Тщательные фотографические наблюдения выявили у Сатурна еще два кольца, невидимых в телескопы при визуальных наблюдениях. Одно темное кольцо *D* находится внутри крепового кольца и почти примыкает к самой планете (оно открыто в 1933 г. советскими астрономами, профессором Н. П. Барабашовым и Б. Е. Семейкиным, а окончательно подтверждено 28 октября 1969 г. французским астрономом П. Гереном). Другое темное кольцо — *E* (открытое в конце 1966 г. американцем В. Фейбельманом) расположено с внешней стороны вокруг кольца *A* и более чем вдвое превышает его по диаметру, так что ближайшие спутники Сатурна — Янус (X) и Энцелад (II), движущиеся в плоскости экватора планеты, все время находятся внутри этого кольца, а спутник Мимас (I), уклоняющийся от экваториальной плоскости на $1°,5$, дважды пересекает его при каждом обороте вокруг планеты. Тем не менее кольцо не препятствует движению спутников, так как мельчайшие пылинки и твердые частицы, входящие в состав всех колец, разбросаны на значительных расстояниях друг от друга. Освещаемые Солнцем яркие кольца хорошо видны, но даже в них, по исследованиям советского астрофизика М. С. Боброва, размеры частиц не превышают 1—2 м, и эти кольца настолько разреженны и прозрачны, что сквозь них просвечивают звезды. Остальные кольца еще разреженнее, и размеры их частиц, по-видимому ледяных, не более 2 см; именно поэтому они отражают настолько мало солнечного света, что два из них не видны даже в сильные телескопы. Еще два кольца открыты американской станцией «Пионер-11», пролетевшей в начале сентября 1979 г. на расстоянии 10 тыс. км от поверхности Сатурна. Она же обнаружила XI спутника планеты, названного Скалой пионера, и XII спутника.

Исследования, проведенные в декабре 1966 г. советским астрофизиком Р. И. Киладзе и французским астрофизиком О. Дольфюсом, показали, что кольца Сатурна необычайно тонки: при колоссальной протяженности их толщина не превышает 3 км. Это приводит к периодическому «исчезновению» колец.

Дело в том, что плоскость колец и экватора планеты сохраняет направление в пространстве. Поэтому дважды за период обращения Сатурна вокруг Солнца, примерно через каждые 14,7 года, его кольца бывают обращены к Земле ребром и становятся невидимыми, и только их тень узкой темной полоской падает на диск планеты. Незнание этого простого явления иногда приводит к курьезам. Когда в 1920 г. произошло исчезновение колец Сатурна, невежественные люди распустили слух о том, что будто кольца Сатурна раскололись на

части и их обломки летят к Земле. Астрономам пришлось вмешаться и через широкую печать опровергнуть вымыслы и разъяснить сущность явления.

Последнее исчезновение колец Сатурна было в декабре 1966 г. Очередные исчезновения колец произойдут в 1979—1980 и 1994 гг.

УРАН И НЕПТУН

Обе эти планеты находятся на огромных расстояниях от Солнца, скудно им освещаются и поэтому еще плохо изучены. По своим физическим характеристикам обе планеты сходны друг с другом: средний диаметр Урана в 3,9, а Нептуна — в 3,8 раза превышает диаметр Земли, а массы, соответственно, в 14,6 и 17,2 раза больше земной массы.

Видимая поверхность (диск) каждой планеты представляет собой плотные слои протяженной атмосферы, состоящей из молекулярного водорода (50%), метана (20%) и аммиака (не менее 5%), находящегося в стадии насыщения, т. е. часть его присутствует в жидком и даже кристаллическом виде. По условиям обогревания солнечными лучами температура видимой поверхности Урана должна быть близкой к —220°С, а Нептуна к —230°С. Однако по радиоизлучению планет установлено, что температура поверхности Урана около —150°С, а Нептуна близка к —170°С и повышается в глубинных слоях атмосферы — это свидетельствует о горячих недрах планет, имеющих структуру, сходную со структурой Юпитера и Сатурна.

Хотя угловые диаметры дисков этих планет очень малы (у Урана не более 4″, а у Нептуна около 2″,5), все же на них видны слабые полосы метановых с примесями аммиака облаков, вытянутых вдоль экватора, что позволило установить положение оси вращения планет. У Нептуна ось наклонена на угол в 29°, и планета вращается в прямом направлении с периодом $P = 15^ч48^м = 15^ч,8$, а обращается вокруг Солнца почти за 165 лет.

Уран вращается в обратном направлении (с востока на запад) вокруг оси, отклоненной от перпендикуляра к плоскости его орбиты на 98°. Следовательно, плоскость экватора Урана (и небесного экватора в его небе) пересекается с плоскостью его орбиты под углом $\varepsilon = 180° — 98° = 82°$. Поэтому на протяжении длительного года планеты, продолжающегося 84 земных года, Солнце в ее небе поочередно отходит в обе стороны от небесного экватора не на 23°27′, как в небе Земли, а на 82° (склонение Солнца меняется в пределах $\pm 82°$). Поскольку склонение Солнца нарастает от 0 до 82° за четверть уранового года, или за 21 земной год, то за 1 год оно изменяется примерно на 3°,9, а за 1,5 земных суток — в среднем на 1′, или за одни сутки на 40″.

Применяя к Урану понятие тропиков и полярных кругов (см. с. 37), найдем, что на этой планете тропики расположены на широте $\varphi = \varepsilon = \pm 82°$, т. е. в 8° от полюсов, а полярные круги ($\varphi = 90° — \varepsilon$) — в 8° по обе стороны от экватора, т. е. противоположно расположению аналогичных кругов на Земле и Марсе.

Теперь легко представить условия освещения Солнцем полушарий Урана, период вращения которого вокруг оси[1] $P = 10^ч49^м = 10^ч,8$. В день равноденствия на Уране продолжительность дня и ночи во всех зонах планеты одинакова и

---

[1] Последние сведения о периодах вращения Нептуна и Урана крайне противоречивы, поэтому приведены стандартные сведения.

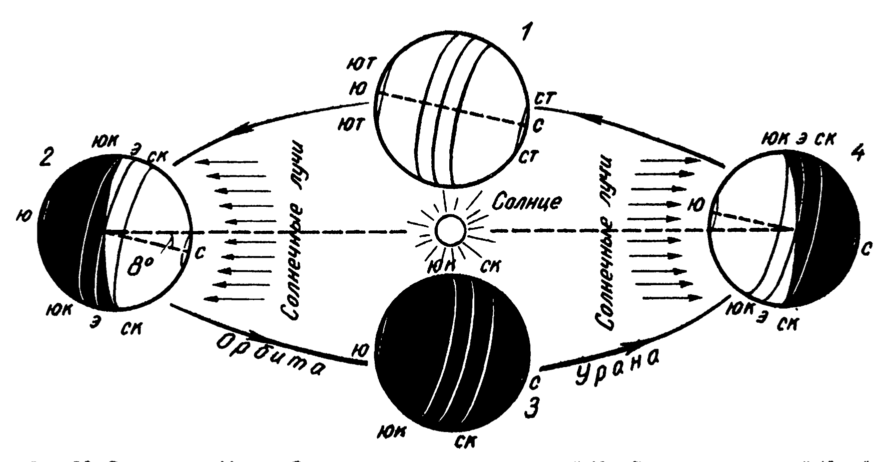


Рис. 88. Освещение Урана Солнцем в дни равноденствий (*1* и *3*) и солнцестояний (*2* и *4*): сю — ось вращения, с — северный полюс, ю — южный полюс, ээ — экватор, ст — северный тропик (φ = +82°), ют — южный тропик (φ = —82°), ск — северный полярный круг (φ = +8°), юк — южный полярный круг (φ = —8°).

равна $5^ч24^м$; над экватором Солнце в полдень проходит в зените, а на обоих полюсах видно на горизонте (рис. 88, положение *1*). С каждым днем Солнце медленно отходит от небесного экватора, например к северу, смещаясь на 1′ за 1,5 суток (3,4 урановых суток) и в окрестностях северного полюса становится незаходящим светилом, постепенно поднимаясь над горизонтом; в окрестностях южного полюса наступает полярная ночь, длительностью в 42 земных года.

Постепенно зоны полярного дня и полярной ночи распространяются в сторону экватора. Примерно через 2 года (1680 планетных суток) после равноденствия Солнце отойдет от небесного экватора к северу на 8°, на такой же высоте окажется над горизонтом северного полюса, в полдень пройдет в зените над северным полярным кругом (φ = +8°), и зона полярного дня распространится от полюса до северного тропика (φ = +82°), а южнее его день сменяется более короткой ночью. На самом экваторе продолжительность дня и ночи по-прежнему одинакова (по $5^ч24^м$), а в южном полушарии день короче ночи вплоть до южного тропика (φ = —82°), за которым длится полярная ночь.

В последующие дни вследствие увеличения своего склонения Солнце в полдень проходит в зените более северных мест планеты. Его высота над северным полюсом непрерывно возрастает, зоны полярного дня и полярной ночи расширяются, и наконец через 21 год (четверть уранового года) после равноденствия склонение Солнца станет наибольшим δ = +82° — наступит солнцестояние (рис. 88, положение *2*). Теперь в полдень Солнце пройдет в зените над северным тропиком, над горизонтом северного полюса поднимется на высоту 82° (!), почти во всем северном полушарии планеты (от северного полюса до северного полярного круга) оно станет незаходящим (полярный день), а зона полярной ночи в южном полушарии распространится до южного полярного круга (φ = —8°). Только в узкой экваториальной полосе, шириной 16°, Солнце будет восходить и заходить, поднимаясь над экватором на высоту всего лишь в 8°

После дня солнцестояния склонение Солнца медленно убывает, границы полярного дня и полярной ночи постепенно перемещаются в сторону полюсов планеты и через 19 лет доходят до тропиков, а затем, еще через два года, снова наступит равноденствие (см. рис. 86, положение *3*). Таким образом, в отличие от Земли, на Уране умеренные пояса отсутствуют и Солнце периодически проходит в зените всех мест планеты, кроме полярных зон, ограниченных тропиками, а полярные дни и ночи бывают на всей планете, кроме узкого экваториального пояса, заключенного между полярными кругами.

Точнейшими наблюдениями с применением электрофотометров у Урана обнаружено девять очень разреженных пылевых колец, невидимых в телескопы.

У Урана пять спутников. Все они движутся вокруг планеты в плоскости ее экватора по почти круговым орбитам в обратном направлении, т. е. в сторону осевого вращения самой планеты. Самый близкий из них и наименьший по размерам, Миранда, имеет диаметр около 500 км, а самый крупный, четвертый по расстоянию от планеты, Титания, — около 1600 км и обращается за 8,71 суток на среднем расстоянии в 439 тыс. км. Наиболее далекий спутник, Оберон, диаметром в 1460 км, обращается вокруг планеты с периодом в 13,46 суток на среднем расстоянии от нее в 587 тыс. км. Оба крупных спутника открыты В. Гершелем в 1787 г.

Нептун обладает двумя спутниками. Первый из них, Тритон, диаметром 4000 км, был обнаружен англичанином В. Лесселем (1799—1880) в начале октября 1846 г., т. е. меньше, чем через две недели после открытия самой планеты. Этот спутник обращается в обратном направлении с периодом в 5,88 суток по круговой орбите радиусом 353 тыс. км. Другой спутник, Нереида, диаметром 300 км движется в прямом направлении по очень вытянутой эллиптической орбите с большой полуосью $a = 5570$ тыс. км и эксцентриситетом $e = 0{,}75$, и его период обращения составляет 360 суток.

НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ

Читателям будет полезно вычислить высоту Солнца в верхней и нижней кульминации на экваторе, тропиках, полярных кругах и полюсах различных планет, сопровождая вычисления чертежами, аналогичными рисункам 19, 20, 29 и 88, на которых можно показать приближенную продолжительность дня и ночи в различных зонах планеты. Полезно также вычислить блеск Солнца (в звездных величинах m) и диаметр d его диска по наблюдениям с различных планет, помня, что малые угловые размеры изменяются обратно пропорционально расстоянию, а блеск — обратно пропорционально квадрату расстояния. За исходные данные следует принять те же величины, видимые с Земли, — блеск $m_\odot = -26^m{,}8$ и диаметр $d_\odot = 32'$.

Выразив в астрономических единицах средние гелиоцентрические расстояния планеты a и Земли $a_0 = 1$ а.е., найдем

$$d = \frac{d_\odot}{a},$$

а так как блеск

$$\frac{E}{E_\odot} = \frac{a_0^2}{a^2} = \frac{1}{a^2},$$

то, учитывая формулу Погсона (1.1),

$$m = m_{\odot} + 5 \lg a .$$

Несколько сложнее вычислять часовые углы небесных светил в заданные моменты времени или решать обратную задачу, т. е. находить моменты времени, в которые часовые углы небесных светил имеют определенные значения. Поскольку часовой угол t любого светила связан с его прямым восхождением α и со звездным временем S формулой

$$t = S - \alpha , \tag{6.1}$$

то в обеих задачах необходимо знать звездное время в определенные моменты по местному времени T, принятому на данной территории.

Как сказано в главе II, звездные сутки короче средних солнечных суток на $3^{м} 56^{с}$, и поэтому звездное время ежесуточно опережает среднее время на $3^{м} 56^{с}$. Так, например, если в полночь ($T = 0^{ч}$) какой-то календарной даты звездное время было $s = 0^{ч}$ (это возможно только вблизи дня осеннего равноденствия), то в полночь следующей календарной даты звездное время будет $s = 0^{ч} 3^{м} 56^{с}$, а в очередную полночь $s = 0^{ч} 7^{м} 52^{с}$ и т. д. За каждый промежуток в 1 час среднего времени звездное время не только увеличивается на 1 час, но и уходит вперед на

$$k = \frac{3^{м} 56^{с}}{24} = \frac{3^{м},933}{24} = 0^{м},164, \text{ или } k = 9^{с}, 8.$$

Следовательно, если в полночь ($T = 0^{ч}$) какой-то календарной даты звездное время было s, то в любой другой момент местного времени T той же даты звездное время

$$S = s + T + kT , \tag{6.2}$$

так как за интервал T среднего времени звездное время увеличится на T и уйдет еще вперед на kT. Таков принцип вычисления моментов по звездному времени.

Но звездное время связано с географической долготой, а местное время от нее не зависит, так как оно принято на всей территории часового пояса, имеющего значительную протяженность по географической долготе. Поэтому, хотя местная полночь наступает во всем часовом поясе одновременно, звездное время в его восточных районах в этот момент больше, чем в западных районах, на разность их географической долготы. Отсюда следует, что для вычисления звездного времени по формуле (6.2) необходимо знать его значение в полночь на различных географических меридианах.

Однако можно обойтись и без этого, потому что в астрономических календарях-ежегодниках публикуются значения звездного времени в Гринвиче, от меридиана которого ведется к востоку счет географической долготы. В Астрономическом календаре-ежегоднике Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО) значения звездного времени в Гринвиче даются на гринвичскую полночь ($T_0 = 0^{ч}$) каждой календарной даты. В Школьном астрономическом календаре (в разделе I) приведены значения звездного времени s_0 в Гринвиче

для момента московской полночи ($T_м = 0^ч$), которая наступает на $3^ч$ раньше, чем в Гринвиче. Эти сведения позволяют решать задачи на определение звездного времени в любом месте земной поверхности.

Покажем, как воспользоваться для этой цели Школьным астрономическим календарем. Пусть требуется найти звездное время S в некотором пункте с географической долготой λ в произвольный момент T по принятому в этом пункте времени, отличающемуся от московского времени $T_м$ на ΔT целых часов. Зная T и ΔT, находим момент по московскому времени $T_м = T - \Delta T$, который одновременно означает интервал времени $T_м$, протекший с московской полночи (в московскую полночь московское время $T_м$ было равно $0^ч$). Следовательно, раз в московскую полночь звездное время в Гринвиче было s_0, то, в соответствии с формулой (6.2), в момент $T_м$ московского времени звездное время в Гринвиче

$$S_0 = s_0 + T_м + kT_м,$$

а в пункте с географической долготой λ, согласно формуле (2.4), звездное время

$$S = S_0 + \lambda = s_0 + \lambda + T_м + kT_м. \qquad (6.3)$$

Подставляя в формулу (6.3) $T_м = T - \Delta T$, окончательно получим:

$$S = s_0 + \lambda + (T - \Delta T) + k(T - \Delta T), \qquad (6.4)$$

где $k = 0^м,164$ при точности вычислений до $0^м,1$, а при точности до $1^с$ $k = 9^с,8$. В произведении $k(T - \Delta T)$ разность $(T - \Delta T)$ должна быть выражена обязательно в часах и десятых долях часа, так как коэффициент k показывает, на сколько звездное время опережает среднее за его интервал в 1 час.

Приведем пример. Требуется вычислить часовой угол звезды Регула (α Льва) в Ташкенте 3 мая 1980 г. в $22^ч35^м$. Разность во времени между Ташкентом и Москвой $\Delta T = 3^ч$, а географическая долгота Ташкента $\lambda = 4^ч37^м11^с$.

Из Школьного астрономического календаря на 1979/80 учебный год выписываем прямое восхождение звезды Регула $\alpha = 10^ч07^м,0$ и звездное время в Гринвиче в московскую полночь $s_0 = 11^ч43^м42^с$.

Поскольку прямое восхождение звезды дано с точностью до $0^м,1$, то λ и s_0 тоже должны быть взяты с такой же точностью. Следовательно, в задаче дано:

Ташкент, $T = 22^ч35^м$; $\Delta T = 3^ч$; $\lambda = 4^ч37^м,2$;

Звезда, $\alpha = 10^ч07^м,0$;

Звездное время в Гринвиче $s_0 = 11^ч43^м,7$.

Решение. Когда 3 мая 1980 г. в Ташкенте местное время $T = 22^ч35^м$, то в этот же момент там же, согласно формуле (6.4), звездное время

$$S = 11^ч43^м,7 + 4^ч37^м,2 + (22^ч35^м - 3^ч) + 0^м,164 \cdot (22^ч35^м - 3^ч) = 35^ч55^м,9 + \\ + 0^м,164 \cdot 19,6 = 35^ч55^м,9 + 3^м,2 = 35^ч59^м,1,$$

и так как звездные сутки содержат только $24^ч$, то звездное время

$$S = 35^ч59^м,1 - 24^ч = 11^ч59^м,1.$$

Тогда, согласно формуле (6.1), часовой угол Регула

$$t = S - \alpha = 11^{ч}59^{м},1 - 10^{ч}07^{м},0 = 1^{ч}52^{м},1 .$$

Переведя по таблице 1 (см. с. 155) единицы времени в угловые единицы, найдем: $1^{ч} = 15°$; $52^{м} = 13°$; $0^{м},1 = 1',5$; следовательно, часовой угол $t = 28°01',5$ или, округляя, $t = 28°02'$ — на таком расстоянии расположена звезда к западу от южной половины небесного меридиана.

Дадим пример обратной задачи. В какое время суток 29 марта 1980 г. планета Юпитер будет находиться в Иркутске в верхней кульминации? Разность во времени между Иркутском и Москвой составляет 5 ч, географическая долгота Иркутска равна $6^{ч}57^{м},1$.

Из Школьного астрономического календаря на 1979/80 учебный год выписываем для 29 марта 1980 г. прямое восхождение Юпитера $\alpha = 10^{ч}15^{м},9$ и звездное время в Гринвиче в московскую полночь $s_0 = 9^{ч}25^{м}43^{с} = 9^{ч}25^{м},7$.

Дано: Юпитер, $\alpha = 10^{ч}15^{м},9$;
Иркутск, $\Delta T = 5^{ч}$; $\lambda = 6^{ч}57^{м},1$;
Звездное время в Гринвиче $s_0 = 9^{ч}25^{м},7$.

Решение. Поскольку Юпитер находится в верхней кульминации, то его часовой угол $t = 0^{ч}$ и поэтому, согласно формуле (6.1), в этот момент в Иркутске звездное время $S = \alpha$, т. е. прямому восхождению Юпитера.

Тогда из формулы (6.4) получим:

$$T + 0^{м},164\,T = S - s_0 - \lambda + \Delta T + 0^{м},164 \cdot \Delta T = 10^{ч}15^{м},9 - 9^{ч}25^{м},7 - 6^{ч}57^{м},1 + 5^{ч} + 0^{м},164 \cdot 5 = -1^{ч}06^{м},1 ,$$

или

$$T + 0^{м},164\,T = 24^{ч} - 1^{ч}06^{м},1 = 22^{ч}53^{м},9.$$

Положив сначала $T = 22^{ч},9$, найдем, что $0^{м},164\,T = 0^{м},164 \cdot 22,9 = 3^{м},8$, и тогда искомое время в Иркутске $T = 22^{ч}53^{м},9 - 3^{м},8 = 22^{ч}50^{м},1$, или, округляя, $T = 22^{ч}50^{м}$.

В заключение отметим, что сведения о физической природе планет очень быстро пополняются результатами новых исследований, и интересующимся планетами мы рекомендуем следить за новинками, публикуемыми в журнале «Земля и Вселенная» и в ежегодных выпусках «Астрономического календаря» Всесоюзного астрономо-геодезического общества.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Связь временных единиц с угловыми

ч	°	мин	° ′	мин	° ′	с	′ ″	с	′ ″
1	15°	1	0°15′	16	4°00′	1	0′15″	16	4′00″
2	30	2	30	17	4 15	2	30	17	4 15
3	45	3	45	18	4 30	3	45	18	4 30
4	60	4	1 00	19	4 45	4	1 00	19	4 45
5	75	5	1 15	20	5 00	5	1 15	20	5 00
6	90	6	1 30	21	5 15	6	1 30	21	5 15
7	105	7	1 45	22	5 30	7	1 45	22	5 30
8	120	8	2 00	23	5 45	8	2 00	23	5 45
9	135	9	2 15	24	6 00	9	2 15	24	6 00
10	150	10	2 30	25	6 15	10	2 30	25	6 15
11	165	11	2 45	26	6 30	11	2 45	26	6 30
12	180	12	3 00	27	6 45	12	3 00	27	6 45
13	195	13	3 15	28	7 00	13	3 15	28	7 00
14	210	14	3 30	29	7 15	14	3 30	29	7 15
15	225	15	3 45	30	7 30	15	3 45	30	7 30

Таблица 2

Сведения об орбитах больших планет

Обозначения: a — большая полуось орбиты; e — эксцентриситет орбиты; i — наклонение орбиты; T — сидерический период обращения; v_a — круговая скорость; ω — среднее суточное движение; S — средний синодический период обращения.

Планета	a	e	i	T			v_a	ω	S
	а.е.			года	года и сутки		км/с	за сутки	сутки
Меркурий	0,387	0,206	7°00	0,241	—	88	47,9	4°,09	116
Венера	0,723	0,007	3 24	0,615	—	225	35,0	1,60	584
Земля	1,000	0,017	—	1,000	1	000	29,8	0,986	—
Марс	1,524	0,093	1 51	1,881	1	322	24,1	0,524	780
Юпитер	5,203	0,048	1 18	11,862	11	315	13,1	0,083	399
Сатурн	9,539	0,055	2 29	29,458	29	167	9,6	0,034	378
Уран	19,19	0,047	0 46	84,01	84	7	6,8	0,012	370
Нептун	30,07	0,008	1 47	164,79	164	280	5,4	0,006	367
Плутон[1]	39,52	0,253	17 08	248,4	248	150	4,7	0,004	367

[1] Элементы орбиты Плутона заметно меняются.

Таблица 3

Физические характеристики больших планет

Обозначения: M — масса в массах Земли ($M_0 = 5{,}98 \cdot 10^{24}$ кг); R — средний радиус; ρ — средняя плотность; e — сжатие; ε — наклонение экватора к орбите (наклон оси вращения); P — период вращения (знак минус указывает на обратное вращение); S — продолжительность солнечных суток; g — ускорение силы тяжести; $w_п$ — критическая скорость на поверхности.

Планета	M	R		ρ	e	ε	P	S	g	$w_п$
		$R_0 = 1$	км	г/см³					м/с²	км/с
Меркурий	0,055	0,383	2440	5,40	0	0—6°	$58^д{,}65$	$176^д$	3,69	4,2
Венера	0,815	0,950	6050	5,26	0	177°	$-243^д{,}16$	$117^д$	8,87	10,4
Земля	1	1	6371	5,52	1:298	23°27′	$23^ч 56^м$	$1^д = 24^ч$	9,81	11,2
Марс	0,107	0,533	3400	3,94	1:192	24 48	24 37	$24^ч 39^м$	3,71	5,0
Юпитер	318	10,96	69800	1,35	1:16	3 07	9 50	9 50	26,2	60,4
Сатурн	95,2	9,10	58000	0,70	1:10	26 45	10 14	10 14	11,3	36,2
Уран	14,6	3,91	24900	1,35	1:18	98°	—10 49	10 49	9,1	21,6
Нептун	17,2	3,78	24100	1,62	1:48	29°	15 48	15 48	11,4	23,7
Плутон?	0,0024	0,20	1250	1,75	?	?	$6^д 9^ч 17^м$	$6^д 9^ч 17^м$	0,59	1,2

ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ВНЕКЛАССНОГО ЧТЕНИЯ

Бронштэн В. А. Планеты и их наблюдение. М., Наука, 1979.

Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной. 7-е изд. М., Наука, 1975.

Гевелий Я. Атлас звездного неба. Ташкент, ФАН, 1978.

Гурштейн А. А. Извечные тайны неба. М., Просвещение, 1973.

Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. Поиски и открытия планет. М., Наука, 1975.

Дагаев М. М. Солнечные и лунные затмения. М., Наука, 1978.

Демин В Г. Судьба Солнечной системы. Популярные очерки по небесной механике. 2-е изд. М., Наука, 1975

Завельский Ф. С. Время и его измерение. 4-е изд. М., Наука, 1977.

Зигель Ф. Ю. Сокровища звездного неба. 3-е изд. М., Наука, 1975.

Ксанфомалити Л. В. Планеты, открытые заново. М., Наука, 1978.

Куликов К. А., Гуревич В. Б. Новый облик старой Луны. М., Наука, 1974.

Левантовский В. И. Механика космического полета в элементарном изложении. 2-е изд. М., Наука, 1975.

Михайлов А. А. Звездный атлас. Четыре карты звездного неба. Л., Наука,1976.

Рябов Ю. А. Движение небесных тел. 3-е изд. М., Наука, 1977.

Селешников С. И. История календаря и хронология. 3-е изд. М., Наука, 1977.

Тейфель В. Г. Юпитер и Сатурн — гиганты Солнечной системы. М., Знание, 1976.

Цесевич В. П. Что и как наблюдать на небе. 2-е изд. М., Наука, 1979.

Школьный астрономический календарь. (Издается ежегодно на очередной учебный год издательством «Просвещение»)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Михаил Михайлович Дагаев

КНИГА ДЛЯ ЧТЕНИЯ ПО АСТРОНОМИИ

Редактор *Л. С. Мордовцева*
Художник *Н. Г. Блинов*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *М. И. Сафронович*
Корректоры *Н. В. Абрамова, Н. С. Рябова*

ИБ № 3361

Сдано в набор 18.12.78. Подписано к печати 17.12.79. А04077. 60 х 90[1]/16. Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл.-п. л. 10,0 + + цв. вкл. 0,25. Уч.-изд. л. 11,94 + цв. вкл. 0,45. Тираж 200 000 экз. Зак. 18. Цена 40 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 150014, г. Ярославль, ул Свободы, 97

40 коп.

